

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Ante Ćurko

Zagreb, 2010.

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet strojarstva i brodogradnje

ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada
prof.dr.sc. Igor Balen

Ante Ćurko

Zagreb, 2010.

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
IZJAVA	II
SAŽETAK RADA	III
POPIS SLIKA	IV
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA I NJIHOVO ZNAČENJE	VI
1. USPOREDBA PROFILA BRZINA ZRAČNOG MLAZA	1
1.1. Definicija mlaza	1
1.2. Osnovne podjele mlaza	1
1.2.1. Podjela mlaza prema udaljenosti od najbliže površine	2
1.2.2. Podjela mlaza prema temperaturi	3
1.2.3. Podjela mlaza prema tipu istrujne površine difuzora	4
1.3. Parametri i terminologija mlaza	7
1.3.1. Domet mlaza	7
1.3.2. Kut širenja (divergencije) mlaza	8
1.3.3. Koeficijent opadanja simetralne brzine mlaza K (eng. Centerline Velocity Decay Constant)	8
1.3.4. Omjer miješanja	9
1.3.5. Propadanje mlaza	9
1.4. Zone širenja mlaza	9
1.5. Usporedba profila brzina zračnog mlaza dobivenog CFD simulacijom sa profilima brzina dobivenih eksperimentalnim mjerenjima	13
1.5.1. Modeliranje rubnih uvjeta istrujavanja zraka	13
1.5.2. Ulazni parametri "Momentum" metode	15
1.5.3. Profili mlaza dobiveni CFD simulacijom	17
1.5.4. Usporedba profila mlaza dobivenih simulacijom s eksperimentalno dobivenim profilima mlaza	18
2. ANALIZA BRZINE STRUJANJA ZRAKA U ZONI BORAVKA SOBE ZA PREZENTACIJE	24
2.1. Osnove distribucije zraka u zatvorenim prostorima	24
2.1.1. Osnove sustava s miješajućim strujanjem	24
2.1.2. Vrtložni stropni difuzori u režimu hlađenja	25
2.2. Ventilacijski zahtjevi sobe za prezentacije	25
2.2.1. Ventilacijski zahtjev prema minimalnom broju izmjena zraka na sat	26
2.2.2. Ventilacijski zahtjev prema broju osoba u prostoriji	28
2.3. Modeliranje toplinskih rubnih uvjeta objekata u prostoriji	29
2.3.1. Modeliranje toplinskih rubnih uvjeta kod ljudi	29
2.3.2. Modeliranje toplinskih rubnih uvjeta kod rasvjete	30
2.3.3. Provjera vrijednosti toplinskih tokova predanih prostoriji	31
2.3.3.1. Rashladno opterećenje od ljudi	31
2.3.3.2. Rashladno opterećenje od rasvjete	33
2.4. Analiza brzine strujanja i temperaturne distribucije zraka u zoni boravka	35
2.4.1. Definiranje zone boravka	35

2.4.2. Intenzitet turbulencije	36
2.4.3. Parametar za ocjenu osjećaja propuha <i>PD</i>	37
2.4.4. Analiza brzine strujanja zraka u zoni boravka	38
2.4.4.1. <i>Proračun PD-a u ravnini udaljenoj 10 cm od poda</i>	40
2.4.4.2. <i>Analiza distribucije brzine strujanja i temperature zraka u ravnini udaljenoj 10 cm od poda</i>	41
2.4.4.3. <i>Proračun PD-a u ravnini udaljenoj 110 cm od poda</i>	44
2.4.4.4. <i>Analiza distribucije brzine strujanja i temperature zraka u ravnini udaljenoj 110 cm od poda</i>	45
2.4.4.5. <i>Proračun PD-a u ravnini udaljenoj 180 cm od poda</i>	48
2.4.4.6. <i>Analiza distribucije brzine strujanja i temperature zraka u ravnini udaljenoj 180 cm od poda</i>	49
3. ZAKLJUČAK	52
POPIS LITERATURE.....	53

IZJAVA

Izjavljujem da sam završni rad izradio samostalno uz konzultacije s mentorom rada prof.dr.sc. Igor Balenom i asistentom Darkom Smoljanom, kojima se ovom prilikom zahvaljujem na ukazanom povjerenju te iznimnoj susretljivosti i kolegijalnosti.

SAŽETAK RADA

Ovaj rad podijeljen je u tri poglavlja.

U prvom poglavlju su uspoređeni profili brzina strujanja zračnog mlaza dobiveni simulacijom sa profilima brzina mlaza koji su dobiveni eksperimentalnim mjerenjima. Pri izradi simulacija korišten je komercijalni CFD software Airpak Fluent, dok su eksperimentalna mjerenja obavljena u laboratoriju Klimaoprema d.d.

U drugom su poglavlju prilikom proračuna parametra za osjećaj pojave propuha na zadanim lokacijama sobe za prezentacije analizirane brzine strujanja u zoni boravka pri čemu su svi za to potrebni podaci dobiveni simulacijama u korištenom software-u Airpak Fluent.

Treće poglavlje je zaključak u kojem su navedena zapažanja pri izradi usporedbe profila brzina mlaza te analize brzine strujanja u zoni boravka sobe za prezentacije.

POPIS SLIKA

Slika	Stranica
1. Slobodni izotermni mlaz	2
2. Prilijepljeni izotermni mlaz	2
3. Slobodni neizotermni mlaz	3
4. Zračni mlazovi različitih tipova istrujnih otvora difuzora	6
5. Zone širenja mlaza	10
6. Pojednostavljeni prikaz laboratorija Klimaoprema d.d.	15
7. Slika istrujne površine difuzora s osnovnim dimenzijama	16
8. Dijagramski prikaz simulacijom dobivenih profila brzina strujanja mlaza na udaljenostima 75, 100, 120, 140, 160, 180 i 210 cm od ishodišta difuzora	18
9. Profili strujanja na udaljenosti 75 cm od ishodišta difuzora	19
10. Profili strujanja na udaljenosti 100 cm od ishodišta difuzora	19
11. Profili strujanja na udaljenosti 120 cm od ishodišta difuzora	20
12. Profili strujanja na udaljenosti 140 cm od ishodišta difuzora	20
13. Profili strujanja na udaljenosti 160 cm od ishodišta difuzora	21
14. Profili strujanja na udaljenosti 180 cm od ishodišta difuzora	21
15. Profili strujanja na udaljenosti 210 cm od ishodišta difuzora	22
16. Vektorski prikaz brzina mlaza na istrujnoj površini vrtložnog stropnog difuzora	23
17. Prikaz kontura brzina na istrujnoj površini vrtložnog stropnog difuzora	23
18. Prikaz sobe za prezentacije u sve tri projekcije i izometriji	36
19. Utjecaj intenziteta turbulencije na postotak nezadovoljnih uslijed pojave propuha	37
20. Dijagramski prikaz rasporeda 25 točaka po ravninama u kojima se provodi proračun PD parametra	39

21. Dijagramski prikaz iznosa brzina i temperatura u točkama 40
ravnine udaljene 10 cm od poda
22. Izometrijski prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini 42
udaljenoj 10 cm od poda
23. Tlocrtni prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini 42
udaljenoj 10 cm od poda
24. Izometrijski prikaz distribucije temperature zraka u ravnini 43
udaljenoj 10 cm od poda
25. Tlocrtni prikaz distribucije temperature zraka u ravnini 43
udaljenoj 10 cm od poda
26. Dijagramski prikaz iznosa brzina i temperatura u točkama 44
ravnine udaljene 110 cm od poda
27. Izometrijski prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini 46
udaljenoj 110 cm od poda
28. Tlocrtni prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini 46
udaljenoj 110 cm od poda
29. Izometrijski prikaz distribucije temperature zraka u ravnini 47
udaljenoj 110 cm od poda
30. Tlocrtni prikaz distribucije temperature zraka u ravnini 47
udaljenoj 110 cm od poda
31. Dijagramski prikaz iznosa brzina i temperatura u točkama 48
ravnine udaljene 180 cm od poda
32. Izometrijski prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini 49
udaljenoj 180 cm od poda
33. Tlocrtni prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini 50
udaljenoj 180 cm od poda
34. Izometrijski prikaz distribucije temperature zraka u ravnini 50
udaljenoj 180 cm od poda
35. Tlocrtni prikaz distribucije temperature zraka u ravnini 51
udaljenoj 180 cm od poda

POPIS TABLICA

Tablica		Stranica
1.	Preporučene vrijednosti koeficijenta opadanja simetralne brzine mlaza K za različite tipove komercijalnih istrujnih otvora	12
2.	Preporučene metode za modeliranje rubnih uvjeta različitih tipova difuzora	14
3.	Brzine strujanja zraka dobivene simulacijom na udaljenosti R (cm) od ishodišta difuzora i y (cm) od stropa	17
4.	Iskustveni brojevi izmjena zraka na sat za prostore različite namjene	26
5.	Vrijednosti metaboličkog učinka u ovisnosti o razini tjelesne aktivnosti	30
6.	Vrijednosti parametra PD u točkama ravnine udaljene 10 cm od poda	40
7.	Vrijednosti parametra PD u točkama ravnine udaljene 110 cm od poda	44
8.	Vrijednosti parametra PD u točkama ravnine udaljene 180 cm od poda	48

POPIS OZNAKA I NJIHOVO ZNAČENJE

<u>Oznaka</u>	<u>Jedinica</u>	<u>Značenje</u>
a	-	Parametar CLTD metode (ovisi o opremi prostorije, načinu ugradnje rasvjete...)
ACH	$[h^{-1}]$	Broj izmjena zraka na sat
A_c	$[m^2]$	Površina jezgre istrujnog otvora
A_o	$[m^2]$	Efektivna površina istrujnog otvora
Ar	$[m^2]$	Arhimedov broj
b	$[m]$	Širina sobe za prezentacije
C	-	Parametar CLTD metode (ovisi o tipu konstrukcije poda)
C_d	-	Koeficijent ispuha (0.65 – 0.9)
CLF	-	Koeficijent rashladnog opterećenja (eng. Cooling Load Coefficient)
f_o	-	Faktor tipa rasvjete
f_u	-	Faktor uključenosti rasvjete (odnos uključene prema isključenoj rasvjeti)
g	$[m/s^2]$	Gravitacijska konstanta
h	$[m]$	Visina sobe za prezentacije
H_o	$[m]$	Širina mlaza na istrujnoj površini ili na vena contracti
K	-	Koeficijent opadanja simetralne brzine mlaza
L	$[m]$	Dimenzija difuzora (unutarnji promjer difuzora)
l	$[m]$	Duljina sobe za prezentacije
n	-	Broj osoba
PD	$[\%]$	Postotak nezadovoljnih osoba uslijed pojave propuha (eng. Percentage of people dissatisfied by draught)
P_{el}	$[W]$	Instalirana električna snaga fluorescentne rasvjete

Q_o	$[m^3/s]$	Volumni protok zraka na istrujnom otvoru
q_v	$[m^3/s]$	Ukupni volumni protok dobavnog zraka
q_{vo}	$[m^3/s]$	Volumni protok dobavnog vanjskog zraka prema broju osoba u prostoriji
Q_x	$[m^3/s]$	Volumni protok zraka na udaljenosti x od istrujnog otvora
q_{v1}	$[m^3/s]$	Protok dobavnog zraka kroz jedan difuzor
r	$[m]$	Radijus istrujne površine vrtložnog stropnog difuzora
R_{fa}	-	Omjer efektivne i ukupne površine istrujnog otvora
SD	$[m/s]$	Standardna devijacija brzine
t_a	$[K]$	Temperatura zraka u točki za ocjenu postotka nezadovoljnih osoba uslijed pojave propuha
T_r	$[K]$	Srednja temperatura zraka u prostoriji
T_s	$[K]$	Temperatura dobavnog zraka
T_u	$[\%]$	Intenzitet turbulencije
T_v	$[m]$	Maksimalni domet mlaza
V	$[m^3]$	Volumen sobe za prezentacije
$V_{o,p}$	$\left[\frac{m^3}{h \cdot \text{osoba}} \right]$	Volumen zraka po satu i osobi
w_a	$[m/s]$	Brzina strujanja zraka u točki za ocjenu postotka nezadovoljnih osoba uslijed pojave propuha
$w_{\max,0.1}$	$[m/s]$	Maksimalna brzina strujanja zraka u ravnini udaljenoj 0.1 m od poda
$w_{\max,1.1}$	$[m/s]$	Maksimalna brzina strujanja zraka u ravnini udaljenoj 1.1 m od poda
$w_{\max,1.8}$	$[m/s]$	Maksimalna brzina strujanja zraka u ravnini udaljenoj 1.8 m od poda

w_0	[m/s]	Srednja brzina strujanja zraka na istrujnom otvoru
w_x	[m/s]	Brzina strujanja zraka na udaljenosti x od istrujnog otvora
X	[m]	Domet mlaza
α	[°]	Kut širenja mlaza
ϕ	[W]	Rashladno opterećenje prostorije od rasvjete
ϕ'	[W]	Trenutni dobitak topline od rasvjete
ϕ_{lat}	[W]	Rashladno opterećenje uslijed odavanja latentne topline od ljudi u prostoriji
ϕ_{lat1}	[W]	Iznos latentne topline koju jedna osoba predaje prostoriji
ϕ_{no}	[W]	Ukupno predana toplina prostoriji od n_o osoba
ϕ_{o1}	[W]	Iznos topline koju jedna osoba predaje prostoriji
ϕ_{os}	[W]	Rashladno opterećenje uslijed osjetne topline koju ljudi predaju prostoriji
ϕ_{os1}	[W]	Iznos osjetne topline koju jedna osoba predaje prostoriji
ϕ_r	[W]	Ukupan iznos topline koju rasvjeta predaje prostoriji
ϕ_{uk}	[W]	Ukupno rashladno opterećenje prostorije od ljudi

1. USPOREDBA PROFILA BRZINA ZRAČNOG MLAZA

1.1. Definicija mlaza

Mlaz je najvažniji oblik strujanja koji se pojavljuje u ventilaciji, a nastaje istrujavanjem fluida iz otvora u veće tijelo ispunjeno istim ili sličnim fluidom.

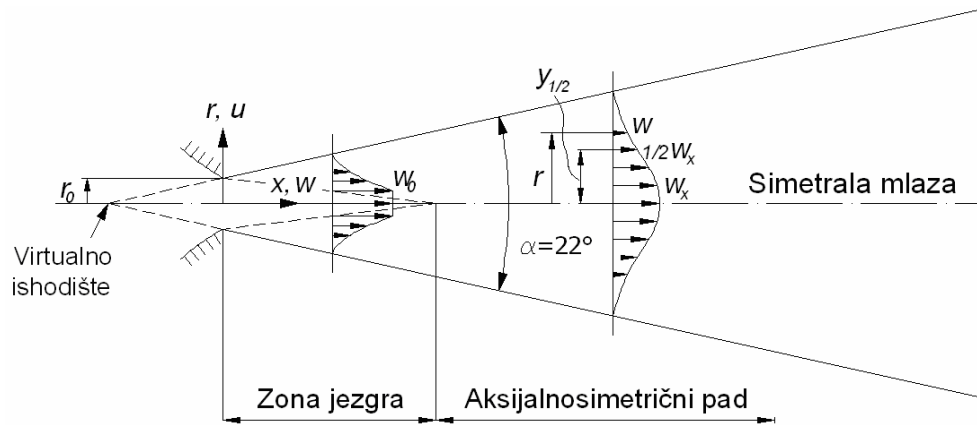
Mlaz predstavlja strujanje fluida na čijim granicama dolazi do tangencijalnog razdvajanja uslijed kojih u samome mlazu dolazi do neravnomjerne raspodjele brzine, temperature i koncentracije tvari, dok raspodjela statičkog tlaka ostaje nepromijenjena. Zbog nestabilnosti tangencijalnih odvajanja, na granicama mlaza nastaju manji i veći vrtlozi koji su odgovorni za prijenos količine gibanja, energije te koncentracije tvari u uzdužnom i poprečnom smjeru strujanja mlaza. Međudjelovanjem većih i manjih vrtloga s mirujućim okolnim fluidom dolazi do povećanja volumena i smanjenja brzine strujanja mlaza. Ova je pojava u skladu s očuvanjem količine gibanja i naziva se indukcija mlaza. U sustavu s miješajućim strujanjem, zrak se u prostoriju ubacuje relativno velikom brzinom. Zbog veće brzine istrujavanja u neki zatvoreni prostor, mlaz povlači za sobom okolni zrak i pri tom usporava, dok se istovremeno difuzija (raspodjela dobavnog zraka u okolni prostor) povećava.

1.2. Osnovne podjele mlaza

Podjela mlaza vrši se prema najbitnijim parametrima difuzije, kao što su temperatura mlaza te udaljenost mlaza od najbliže površine te s obzirom na tip istrujne površine distributera dobavnog zraka.

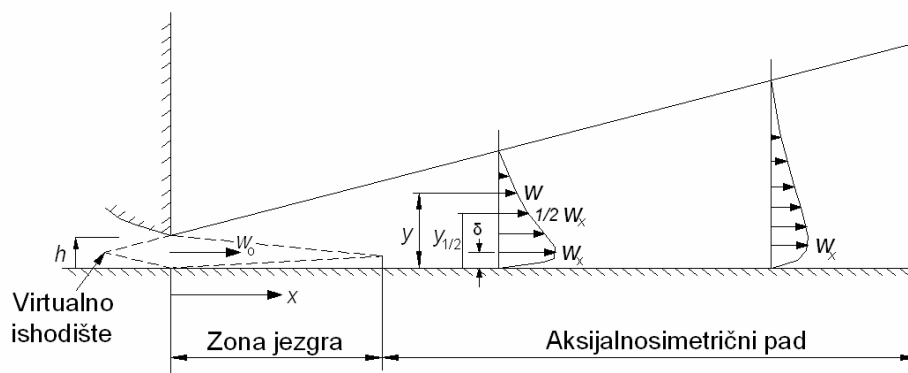
1.2.1. Podjela mlaza prema udaljenosti od najbliže površine

Ukoliko strujanje mlaza nije ometano susjednim objektima (zidovima, stropom ili nekim predmetima u prostoriji), te se mlaz može u svim smjerovima širiti u prostoriji, mlaz nazivamo slobodnim.



Slika 1. Slobodni izotermni mlaz^[1]

Ako je širenje mlaza ograničeno zidovima, stropom ili nekim drugim objektima u prostoriji, mlaz se smatra prilijepljenim, odnosno površinskim, budući da struji uz površinu.



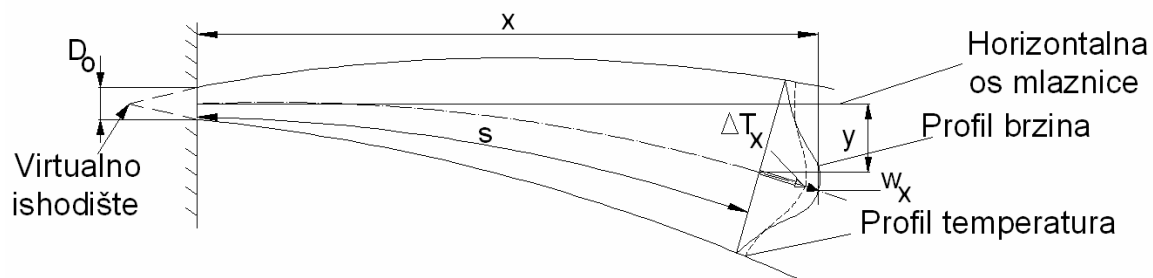
Slika 2. Prilijepljeni izotermni mlaz^[1]

Zbog neposredne blizina neke od ploha u prostoriji, mlazu je ograničeno širenje i miješanje s okolnim zrakom u svim smjerovima. Pri tome se uz plohu uspostavlja zona nižeg tlaka koja privlači mlaz i, uz otklon simetrale mlaza prema plohi, uzrokuje površinsko strujanje mlaza.

Ta pojava poznata je kao Coanda efekt i jedna je od najvažnijih faktora pri razmještanju distributera dobavnog zraka, pogotovo u prostorijama s nižim stropovima gdje je na raspolaganju malo prostora za miješanje zraka iznad zone boravka. Efekt nestaje udaljavanjem mlaza od ishodišta difuzora i povećanjem njegovog obujma prilikom miješanja sa zrakom iz prostorije, uz popratno smanjenje brzine strujanja u osi mlaza. Unatoč tome, razlika između temperature mlaza i okolnog zraka u prostoriji nema velik utjecaj za održavanje efekta.

1.2.2. Podjela mlaza prema temperaturi

Ako je temperatura dobavnog zraka jednaka temperaturi zraka u prostoriji, mlaz se smatra izotermnim (slika 1. i slika 2.) S druge strane, neizotermni mlaz ima početnu temperaturu različitu od temperature zraka u prostoriji.



Slika 3. Slobodni neizotermni mlaz^[1]

Temperaturne razlike (razlike u gustoći) između dobavnog zraka i zraka u prostoriji uzrokovat će nastanak uzgonskih sila u mlazu koje će utjecati na putanju i domet mlaza. Utjecaj uzgonskih i inercijskih sila na ponašanje mlaza iskazuje se Arhimedovim brojem:

$$A_r = \frac{g \cdot \sqrt{A_0}}{w_0^2} \cdot \frac{T_s - T_r}{T_r} \quad (1)$$

1.2.3. Podjela mlaza prema tipu istrujne površine difuzora

Prema ASHRAE-^[2] se mlaz s obzirom na tip istrujne površine difuzora dijeli na:

1. Kompaktni mlaz

Cilindrične cijevi, mlaznice te kvadratni i pravokutni otvori s malim omjerom duljine i širine stranica formiraju kompaktni mlaz. Kompaktni mlazovi su trodimenzionalni i osnosimetrični barem na nekoj udaljenosti od istrujne površine. Maksimalna se brzina takvog mlaza nalazi u poprečnom presjeku na osi strujanja.

2. Linearni mlaz

Linearni mlaz formiraju linijski difuzori ili pravokutni otvori velikog omjera duljine i širine stranica. Linearni je mlaz približno dvodimenzionalan, a profil brzina je simetričan u poprečnom presjeku ravnine u kojem su najveće brzine strujanja. Udaljavajući se od otvora, linearni mlaz prelazi u kompaktni.

3. Radijalni mlaz

Radijalni mlaz formiraju stropni cilindrični difuzori s ravnim diskovima ili distributeri s višestrukim otvorima koji zrak ubacuju horizontalno u svim smjerovima.

4. Stožasti mlaz

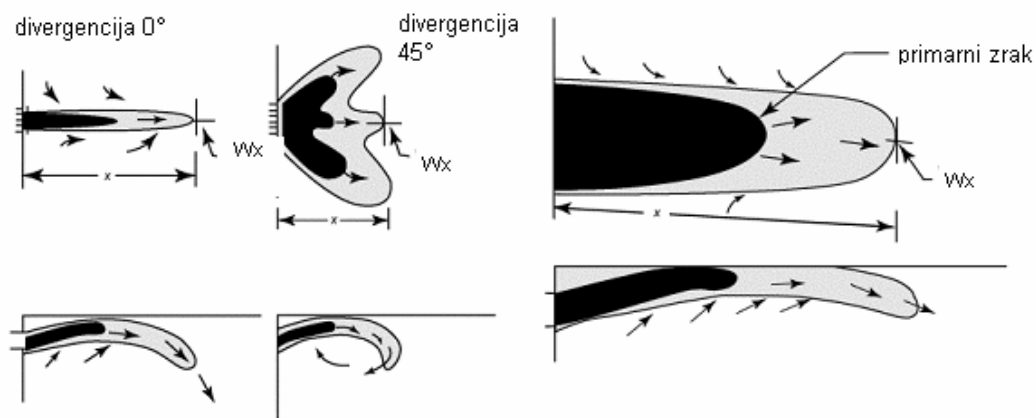
Stožasti ili stropno postavljeni regulirani difuzori s višestrukim otvorima stvaraju stožasti mlaz. Stožasti mlaz struji paralelno istrujnoj površini otvora (kut na vrhu stošca iznosi 120 °) s najvećim brzinama strujanja u poprečnom presjeku koji je okomit na pravac strujanja.

5. Nepotpuni radijalni mlaz

Nepotpuni radijalni mlaz stvaraju rešetkasti otvori s divergentnim lamelama i prisilnim kutom širenja među njima. Ovaj mlaz na određenoj udaljenosti od istrujne površine difuzora također prelazi u kompaktni.

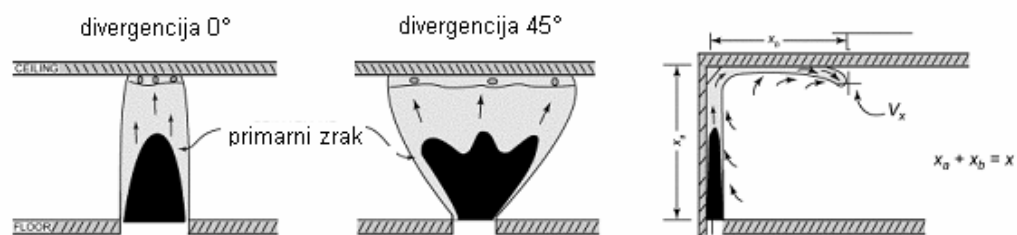
6. Vrtložni mlaz

Vrtložni mlaz je karakterističan za vrtložne difuzore. Ti difuzori stvaraju kružno gibanje mlaza, koji uz aksijalnu, ima i radijalnu te tangencijalnu komponentu brzine. Tip vrtložnog mlaza ovisi o tipu istrujne površine difuzora pa može biti kompaktni, stožasti i radijalni.

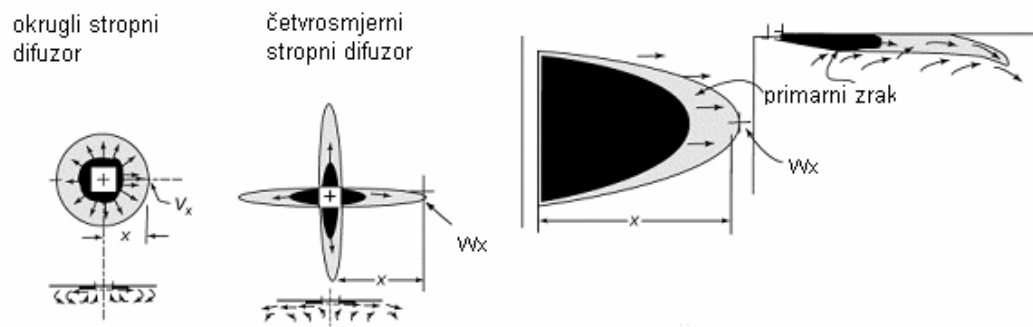


a) zidni rešetkasti otvori

b) zidni linijski difuzori



c) rešetkasti podni otvori



d) stopni difuzori

e) stropni linijski difuzori

Slika 4. Zračni mlazovi različitih tipova istrujnih otvora difuzora^[2]

1.3. Parametri i terminologija mlaza

Jednadžbe mlaza su iskustveni izrazi koji se u osnovi koriste za određivanje profila brzina i temperatura mlaza, ali i za određivanje dometa i intenziteta miješanja. Prije nego se navede podjela mlaza na zone, bitno je definirati osnovne parametre koji se pojavljuju u jednadžbama mlaza, a koji će se kasnije koristiti prilikom modeliranja rubnih uvjeta istrujavanja zraka iz vrtložnih stropnih difuzora.

1.3.1. Domet mlaza

Domet mlaza X po definiciji predstavlja udaljenost mlaza mjerenu okomito ili paralelno površini istrujnog otvora dobavnog zraka (ovisno o dominantnom smjeru strujanja zraka) do mjesta gdje je brzina strujanja zraka za koju domet želimo definirati. Prema literaturi, dopuštene brzine strujanja s kojima zrak ulazi u zonu boravka ne bi smjele prelaziti 0.25 m/s u režimu hlađenja i 0.15 m/s u režimu grijanja.^[3]

Prilikom ugradnje difuzora treba voditi računa o kataloškim podacima proizvođača o dometu i preporučenim udaljenostima difuzora od okolnih objekata i susjednih uređaja za dobavu zraka.

Uz poznatu dobavu i brzinu u osi domet se može izraziti jednadžbom

$$X = \frac{1.13 \cdot K}{w_x} = \frac{Q}{\sqrt{A_c \cdot C_d \cdot R_{fa}}} \quad (2)$$

odnosno ako uvrstimo

$$Z = \sqrt{C_d \cdot R_{fa}} \quad (3)$$

jednadžba će glasiti:

$$X = \frac{1.13 \cdot K}{w_x} = \frac{Q}{Z \cdot \sqrt{A_c}} \quad (4)$$

Maksimalan domet je definiran kao udaljenost mlaza od istrujnog otvora na kojoj je brzina u osi jednaka 0.25 m/s.

$$T_V = X = \frac{1.13 \cdot K}{0.25} \cdot \frac{Q}{Z \cdot \sqrt{A_c}} \quad (5)$$

Maksimalan domet ovisi o karakteristikama uređaja, ugradbenoj visini i utjecaju susjednih uređaja dobavnog zraka.

1.3.2. Kut širenja (divergencije) mlaza

Kut širenja mlaza je jasno definiran u blizini istrujnog otvora. Isto tako je poznato da su granice mlaza valovite i nestabilne te da lako podliježu vanjskim utjecajima. Kao posljedica toga nastaju vrtlozi na mjestima gdje je mlaz pod jačim utjecajem okoline. Izmjereni kutovi širenja kod mlazova koji se iz distributera ubacuju u velike prostore variraju od 20-24° (u prosjeku 22°). Za veći broj dobavnih otvora kod kojih imamo slučaj prilijepljenog mlaza kut širenja iznosi 18°, a kod mlazova koji se ubacuju u manje prostore taj kut je čak i manji.

Kod vrtložnih stropnih difuzora postoji kut vrtloženja mlaza (eng. Swirl angle) koji ovisi o nagibu lamela istrujne površine.

1.3.3. Koeficijent opadanja simetralne brzine mlaza K (eng. Centerline Velocity Decay Constant)

Koeficijent K obuhvaća sve faktore koji utječu na pad simetralne brzine mlaza. Funkcija je tipa (geometrije) istrujnog otvora i njegov je odabir ključan korak u određivanju brzine mlaza na udaljenosti x od istrujnog otvora. Iako se uzima kao konstantna vrijednost, mjerenja su pokazala da koeficijent K nije konstantan te da ovisi o mnogim faktorima kao što su skučenost mlaza u prostoriji, povratnom strujanju mlaza, veličini istrujnog otvora i Reynoldsovom broju.

1.3.4. Omjer miješanja

Pomoću omjera miješanja određujemo ukupno gibanje mlaza na udaljenosti x od istrujnog otvora.

Za glavnu zonu širenja kružnih mlazova vrijedi :

$$\frac{Q_x}{Q_0} = \frac{2 \cdot X}{1.13 \cdot K \sqrt{A_0}} = 2 \cdot \frac{w_x}{w_0} \quad (6)$$

Za linearne mlazove vrijedi:

$$\frac{Q_x}{Q_0} = \sqrt{\frac{2}{1.13 \cdot K}} \cdot \sqrt{\frac{X}{H_0}} = \sqrt{2} \cdot \frac{w_x}{w_0} \quad (7)$$

Navedene jednadžbe nam ukazuju da kružni mlazovi imaju veći omjer miješanja i ukupno gibanje od linijskih mlazova zbog manjih vrijednosti koeficijenta K .

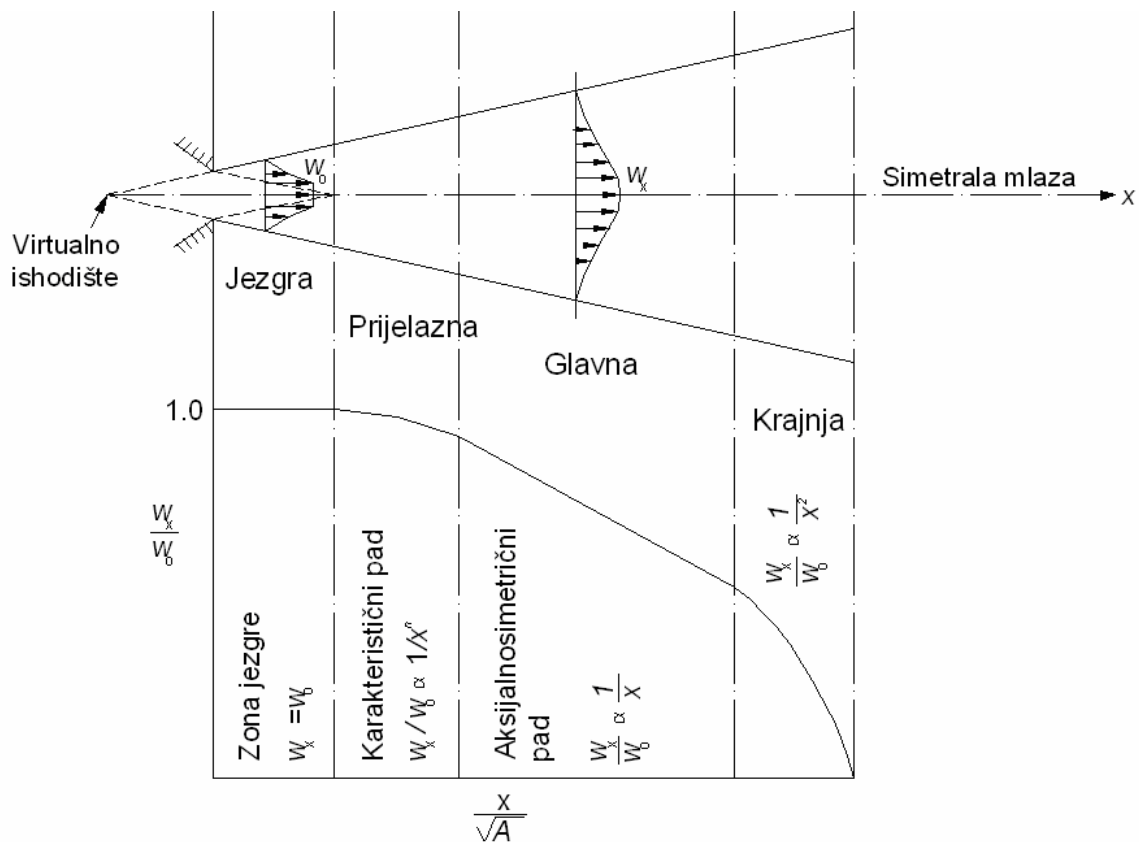
1.3.5. Propadanje mlaza

Propadanje mlaza je definirano kao vertikalna udaljenost od simetrale distributera dobavnog zraka do donjeg ruba izovele 0.25 m/s.

1.4. Zone širenja mlaza

S obzirom na maksimalnu brzinu ili brzinu u osi strujanja te na temperaturnu raspodjelu u presjeku strujanja, mlaz po cijeloj svojoj dužini dijelimo na 4 zone:

1. Zona - jezgra mlaza
2. Zona - prijelazna zona
3. Zona - glavna zona
4. Zona - krajnja zona



Slika 5. Zone širenja mlaza^[1]

1. Zona

Prva zona još je poznata kao jezgra mlaza. Proteže se na otprilike 4 promjera ili širine od istrujne površine i relativno je mala u odnosu na glavnu zonu.

U prvoj je zoni brzina duž osi strujanja jednaka efektivnoj brzini, $w_0 = w_x$, i duž cijele zone ostaje gotovo nepromijenjena (kao i temperatura).

2. Zona

Duljina prijelazne zone određena je tipom istrujnog otvora, omjerom duljine i širine otvora, početnom turbulencijom mlaza i mnogim drugim parametrima. Proteže oko 8 promjera u dužinu te se može zanemariti kod kružnih i ravninskih mlazova kada je omjer duljine i širine (visine) otvora manji od 13.5.

Eksperimentalno je dokazano da se u prijelaznoj zoni brzina u osi smanjuje obrnuto proporcionalno drugom korijenu udaljenosti od istrujnog otvora :

$$\frac{w_x}{w_o} = \sqrt{\frac{1.13 \cdot K \cdot H_o}{X}} \quad (8)$$

Prve dvije zone su relativno male u usporedbi s glavnom zonom.

3. Zona

U glavnoj je zoni potpuno razvijeno (izobraženo) turbulentno strujanje mlaza. Ona je od najveće važnosti za praktične primjene, jer obično upravo u njoj mlaz ulazi u zonu boravka. Iz tog razloga je glavna zona i najviše istražena od svih zona.

Maksimalna brzina tj. brzina duž osi strujanja u glavnoj zoni mlaza, može se precizno odrediti slijedećim izrazima:

$$\frac{w_x}{w_o} = \frac{K \cdot D_o}{X} = \frac{1.13 \cdot K \cdot \sqrt{A_o}}{X} \quad (9)$$

$$w_x = \frac{1.13 \cdot K \cdot w_o \cdot \sqrt{A_o}}{X} = \frac{1.13 \cdot K \cdot Q}{X \cdot \sqrt{A_o}} \quad (10)$$

$$w_x = \frac{1.13 \cdot K \cdot Q}{X \cdot \sqrt{A_c \cdot C_d \cdot R_{fa}}} \quad (11)$$

A_o predstavlja efektivnu istrujnu površinu. Uz upotrebu odgovarajuće vrijednosti koeficijenta K u gornjim je jednadžbama za vrijednost A_o dozvoljeno koristiti istrujnu površinu komercijalnih difuzora.

Tip otvora	Tip istrujavanja (kut lamela)	<i>K</i>
Zidne rešetke Slika 4 a)	divergencija 0° divergencija 45°	5 3,7
Zidni linijski difuzor Slika 4 b)		3,9
Podne rešetke Slika 4 c)	divergencija 0° divergencija 45°	4,4 2,6
Podne rešetke (uz zid) Slika 4 c)	divergencija 0° široki kut	3,9 1,8
Stropni okrugli difuzor Slika 4 d)	zidni mlaz	1,0
Stropni četvero-smjerni Slika 4 d)	zidni mlaz	3,3
Stropni linijski difuzor Slika 4 e)	zidni mlaz	4,8

Tablica 1. Preporučene vrijednosti koeficijenta opadanja simetralne brzine mlaza *K* za različite tipove komercijalnih istrujnih otvora^[2]

Nisko brzinska ispitivanja pokazala su da bi se vrijednosti koeficijenta *K* trebale smanjiti za 20% pri računanju dometa za brzinu $w_x = 0.25 \text{ m/s}$

4. Zona

U krajnjoj zoni maksimalna brzina izrazito opada (kao i temperatura) te su u njoj brzine strujanja jednake brzinama strujanja zraka u prostoriji. Udaljenost ove zone od istrujnog otvora te njena duljina ovise o brzini i turbulenciji zraka u prostoriji. Odvajanjem mlaza hladnog zraka u krajnjoj zoni može doći do pojave propuha te je potrebno paziti da brzina u njoj ne prelazi 0.25 m/s. Značajke krajnje zone nisu u potpunosti poznate.

1.5. Usporedba profila brzina zračnog mlaza dobivenog CFD simulacijom sa profilima brzina dobivenih eksperimentalnim mjerenjima

CFD simulacije su računalni modeli kod kojih se na mreži konačnih volumena korištenjem numeričkih metoda vrši rješavanje parcijalnih diferencijalnih jednačbi: jednačbe gibanja, kontinuiteta i energetske jednačbe. U spomenutom matematičkom modelu ima više nepoznanica nego jednačbi, zato što jednačbe gibanja u turbulentnom obliku sadrže turbulentna naprezanja koja predstavljaju dodatne nepoznanice. Iz tog se razloga, da bi se zadovoljio broj nepoznanica, dodaju jednačbe koje nazivamo modelima turbulencije.

Mlaz vrtložnog stropnog difuzora dobiven CFD simulacijom u komercijalnom software-u Airpak Fluent uspoređen je s mlazom vrtložnog stropnog difuzora tipa DVS-O/600-A/V koji je dobiven eksperimentalnim mjerenjima u laboratoriju Klimaoprema d.d. i čiji su eksperimentalno dobiveni rezultati mjerenja brzine u mlazu iskorišteni za modeliranje rubnih uvjeta istrujavanja zraka.

1.5.1. Modeliranje rubnih uvjeta istrujavanja zraka

Pouzdanost i preciznost CFD simulacija strujanja zraka u prostoriji ovisi o nekoliko čimbenika. Izbor pravilnog modela turbulencije i metode modeliranja rubnih uvjeta jedni su od najbitnijih čimbenika koji utječu na vjerodostojnost prikaza strujanja zraka u prostoriji. Ispravno modeliranje rubnih uvjeta dobavnog zraka je najvažniji čimbenik, jer je početna količina gibanja dobavnog zraka ono što uzrokuje kretanje ukupne količine zraka po prostoriji.

Također je neophodno poznavati način strujanja i temperaturno stanje dobavnog zraka da bismo pouzdano mogli predvidjeti što ćemo dobiti korištenjem CFD simulacija. Za dobivanje informacija o načinu strujanja i toplinskom stanju mlaza dobavnog zraka (za modeliranje rubnih uvjeta), uz istovremeno korištenje eksperimentalno dobivenih podataka služe nam pojednostavljene metode modeliranja rubnih uvjeta.

Dvije najzastupljenije metode modeliranja rubnih uvjeta istrujavanja zraka iz difuzora, koje ne modeliraju njegovu složenu geometriju, već uključuju početnu količinu gibanja dobavnog zraka, su:

1. Metoda količine gibanja (eng. Momentum method)

"Momentum" metoda razdvaja maseni protok i količinu gibanja prilikom CFD simulacija strujanja zraka u prostoriji. Ona koristi početnu količinu gibanja i maseni protok iz difuzora za modeliranje rubnih uvjeta difuzora.

2. Metoda kutije (eng. Box method)

"Box" metoda koristi zadane profile strujanja ispred difuzora kao rubne uvjete za CFD simulacije strujanja zraka u prostoriji.

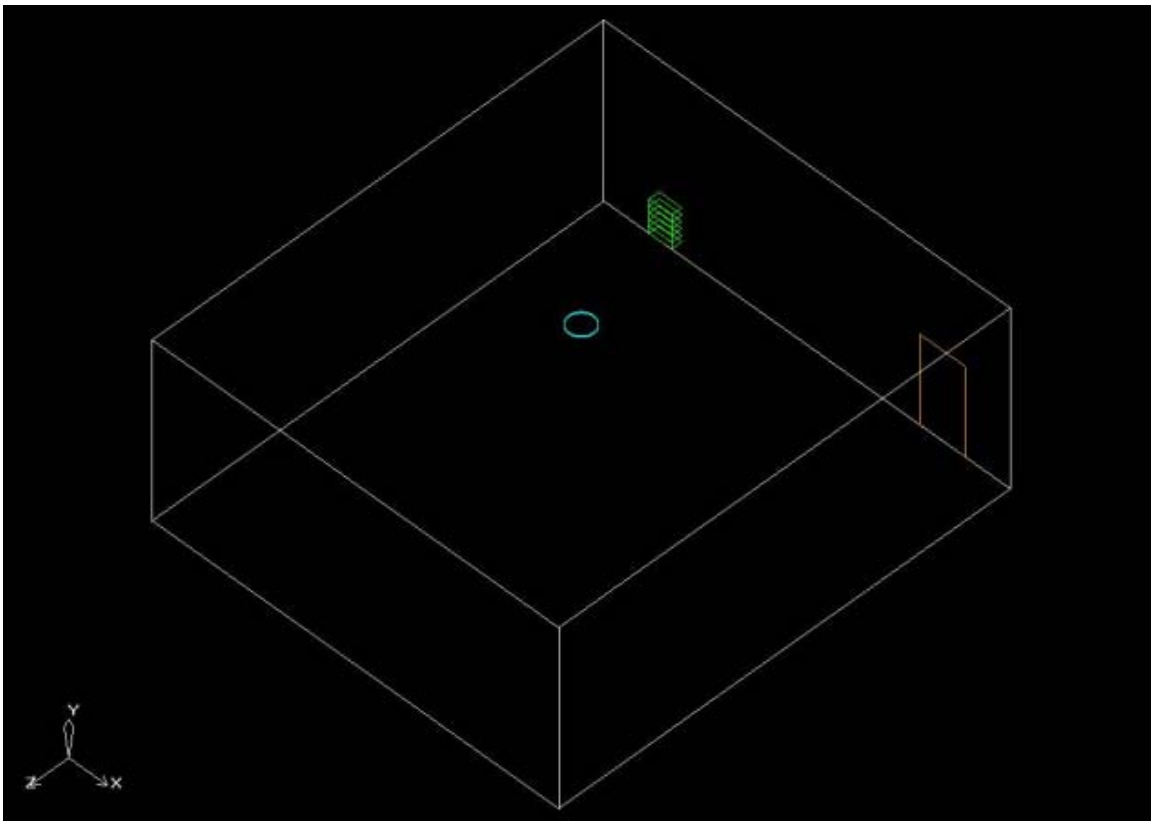
"Momentum" metoda je jednostavnija što se tiče umetanja potrebnih ulaznih parametara od "box" metode i prema preporuci literature^[1] koristi se prilikom modeliranja rubnih uvjeta kod tipova difuzora prikazanih tablicom 2.

Tip difuzora	"Box" metoda	"Momentum" metoda	Preporučena metoda
Linijski	Dobro	Loše	"Box"
Kvadratni stropni	Dobro	Dobro	"Momentum"
Okrugli stropni	Dobro	Dobro	"Momentum"
Vrtložni stropni	Dobro	Dobro	"Momentum"
Rešetkasti	Dobro	Dobro	"Momentum"

Tablica 2. Preporučene metode za modeliranje rubnih uvjeta različitih tipova difuzora^[1]

Software Airpak, koji je korišten za dobivanje profila brzina mlaza simulacijom, po "defaultu" za vrtložne difuzore (eng. Vortex) koristi "momentum" metodu.

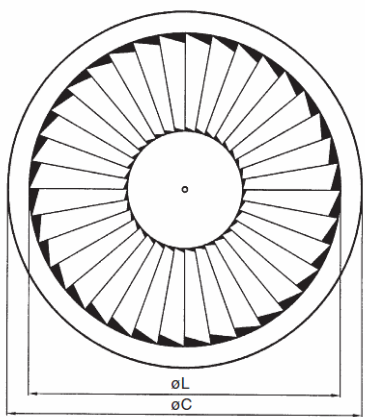
Budući da se profil mlaza nastojao dobiti u uvjetima što sličnijim onima u laboratoriju Klimaoprema d.d., bilo je potrebno smjestiti difuzor na središte stropa prostorije dimenzija $9 \times 10 \times 4$ m, koje odgovaraju dimenzijama laboratorija, te unijeti ulazne parametre mlaza potrebne za modeliranje rubnih uvjeta istrujavanja zraka "momentum" metodom. Ti su podaci dobiveni eksperimentalnim mjerenjima u laboratoriju Klimaoprema d.d.



Slika 6. Pojednostavljeni prikaz laboratorija Klimaoprema d.d.

1.5.2. Ulazni parametri "Momentum" metode

Prilikom modeliranja rubnih uvjeta istrujavanja zraka vrtložnih stropnih difuzora "momentum" metodom u Airpak Fluent-u prvo je nužno definirati geometriju difuzora.



Dimenzije u [mm]

Nazivna veličina	C	L
600	598	538

Slika 7. Slika istrujne površine difuzora s osnovnim dimenzijama^[4]

Za radijus difuzora uzeta je vrijednost:

$$r = 0.5 \cdot L$$

$$r = 0.5 \cdot 538$$

$$r = 0.269 \cdot m$$

Ulazni parametri nužni za modeliranje rubnih uvjeta strujanja korištenjem "momentum" metode na temelju kojih je Airpak Fluent napravio simulaciju su sljedeći:

- protočni volumen dobavnog zraka:

$$q_V = 670 \cdot m^3/h = 0.18611 \cdot m^3/s$$

- brzina strujanja u osi mlaza za koju je definiran domet:

$$w_x = 0.4 \cdot m/s$$

- domet na brzini strujanja $w_x = 0.4 \cdot m/s$

$$X = 2.4 \cdot m$$

- kut vrtloženja (eng. Swirl angle)

$$\alpha = 45^\circ$$

- koeficijent opadanja simetralne brzine mlaza

$$K = 1.1$$

Model turbulencije koji je korišten za izradu simulacije je standardni $k - \varepsilon$ model. Upravo taj model je odabran prema preporuci literature^[1]. Također treba spomenuti da modeliranje toplinskih rubnih uvjeta mlaza nije uzeto u obzir prilikom CFD simulacije, jer je bilo potrebno prikazati samo usporedbu profila brzina zračnih mlazova.

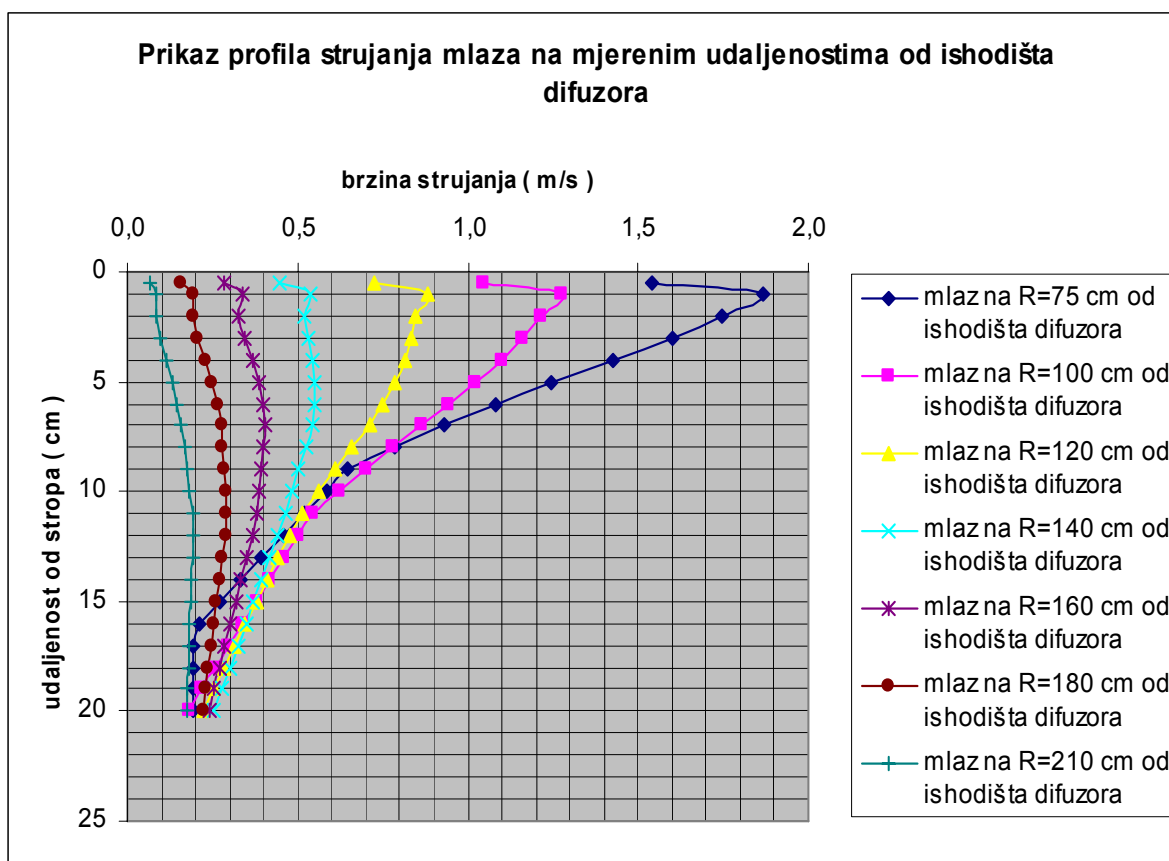
1.5.3. Profili mlaza dobiveni CFD simulacijom

Na udaljenostima 75, 100, 125, 140, 160, 180, i 210 cm od ishodišta difuzora simulacijom su dobiveni sljedeći rezultati:

y (cm)	R=75 cm	R=100 cm	R=120 cm	R=140 cm	R=160 cm	R=180 cm	R=210 cm
0,5	1,539	1,046	0,724	0,448	0,282	0,160	0,068
1	1,869	1,275	0,880	0,538	0,337	0,192	0,084
2	1,747	1,214	0,847	0,520	0,328	0,191	0,087
3	1,601	1,163	0,834	0,529	0,344	0,206	0,098
4	1,424	1,100	0,819	0,545	0,369	0,228	0,114
5	1,244	1,022	0,788	0,550	0,387	0,247	0,130
6	1,081	0,942	0,752	0,551	0,401	0,265	0,146
7	0,933	0,862	0,711	0,545	0,408	0,277	0,159
8	0,787	0,780	0,661	0,523	0,400	0,280	0,167
9	0,649	0,700	0,611	0,503	0,393	0,284	0,175
10	0,585	0,622	0,562	0,483	0,387	0,287	0,183
11	0,521	0,545	0,515	0,465	0,381	0,291	0,192
12	0,458	0,503	0,476	0,444	0,368	0,288	0,194
13	0,396	0,461	0,443	0,419	0,351	0,279	0,191
14	0,334	0,420	0,410	0,395	0,334	0,270	0,189
15	0,274	0,379	0,378	0,371	0,318	0,262	0,186
16	0,214	0,339	0,346	0,348	0,301	0,253	0,184
17	0,195	0,299	0,315	0,325	0,285	0,246	0,182
18	0,193	0,259	0,283	0,302	0,270	0,238	0,180
19	0,192	0,220	0,252	0,278	0,254	0,230	0,178
20	0,191	0,182	0,222	0,255	0,239	0,223	0,176

Tablica 3. Brzine strujanja zraka dobivene simulacijom na udaljenosti R (cm) od ishodišta difuzora i y (cm) od stropa

Pomoću rezultata prikazanih u tablici 3. u Excelu je napravljen dijagramski prikaz profila strujanja mlaza.

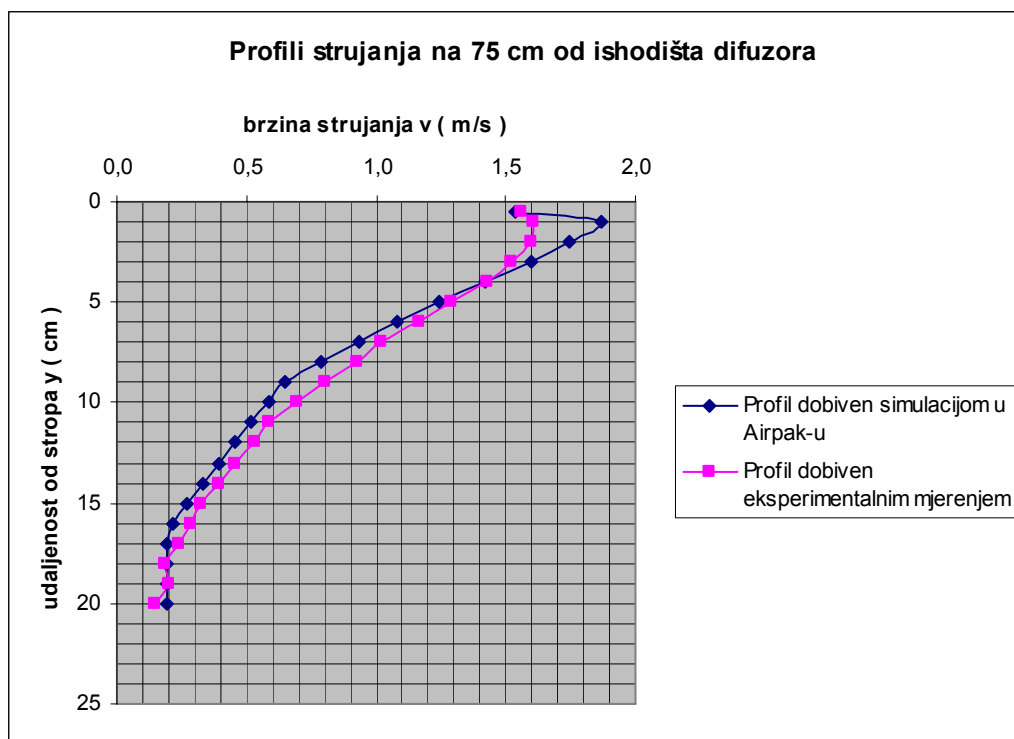


Slika 8. Dijagramski prikaz simulacijom dobivenih profila brzina strujanja mlaza na udaljenostima 75, 100, 120, 140, 160, 180 i 210 cm od ishodišta difuzora

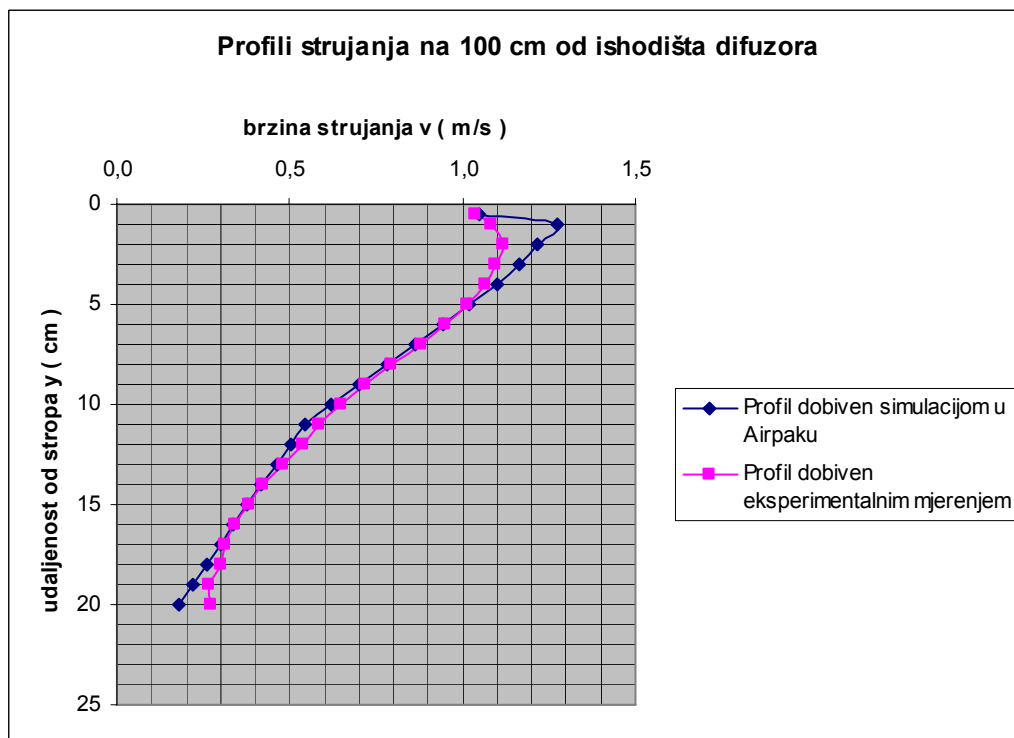
S poznatim profilima zračnog mlaza dobivenih simulacijom možemo svakog pojedinačno usporediti s eksperimentalno dobivenim profilima mlaza na jednakim udaljenostima od ishodišta difuzora.

1.5.4. Usporedba profila mlaza dobivenih simulacijom s eksperimentalno dobivenim profilima mlaza

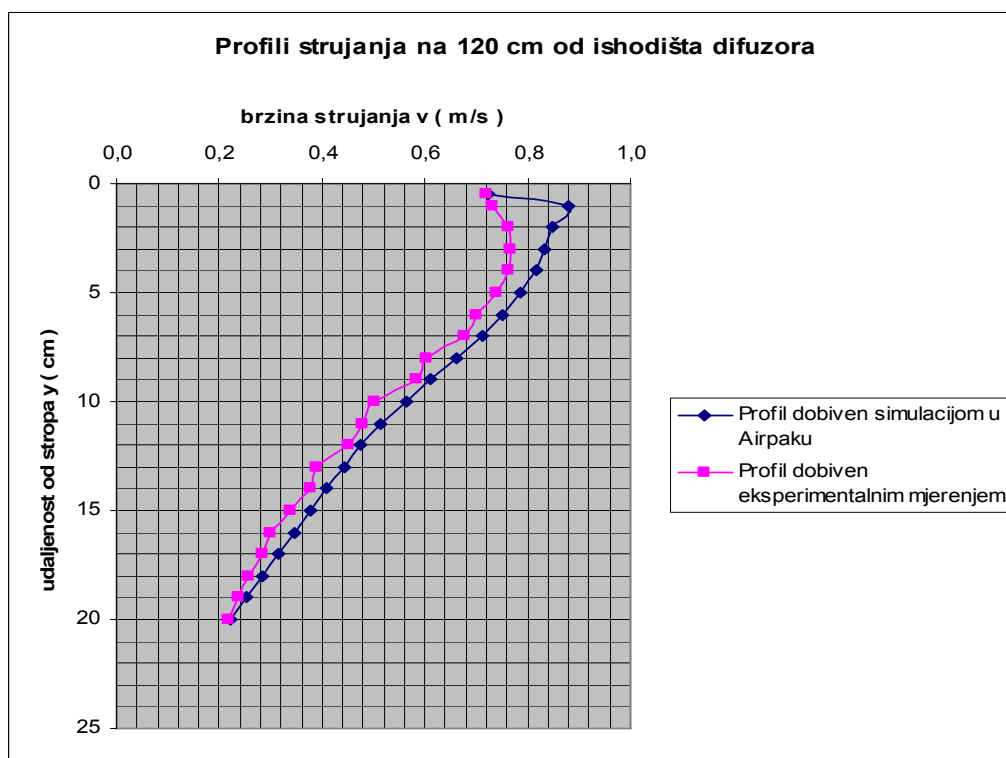
Usporedbe profila mlaza dobivenih simulacijom U Airpak Fluentu s eksperimentalno dobivenim profilima mlaza u laboratoriju Klimaoprema d.d. prikazane su slikama 9 do 15.



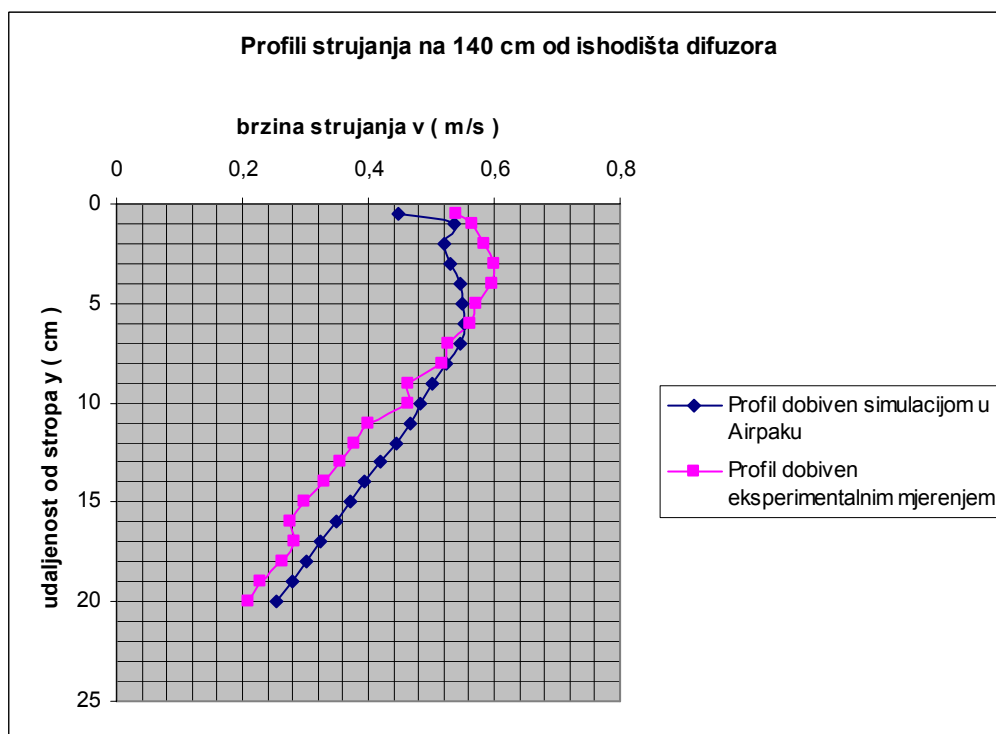
Slika 9. Profili strujanja na udaljenosti 75 cm od ishodišta difuzora



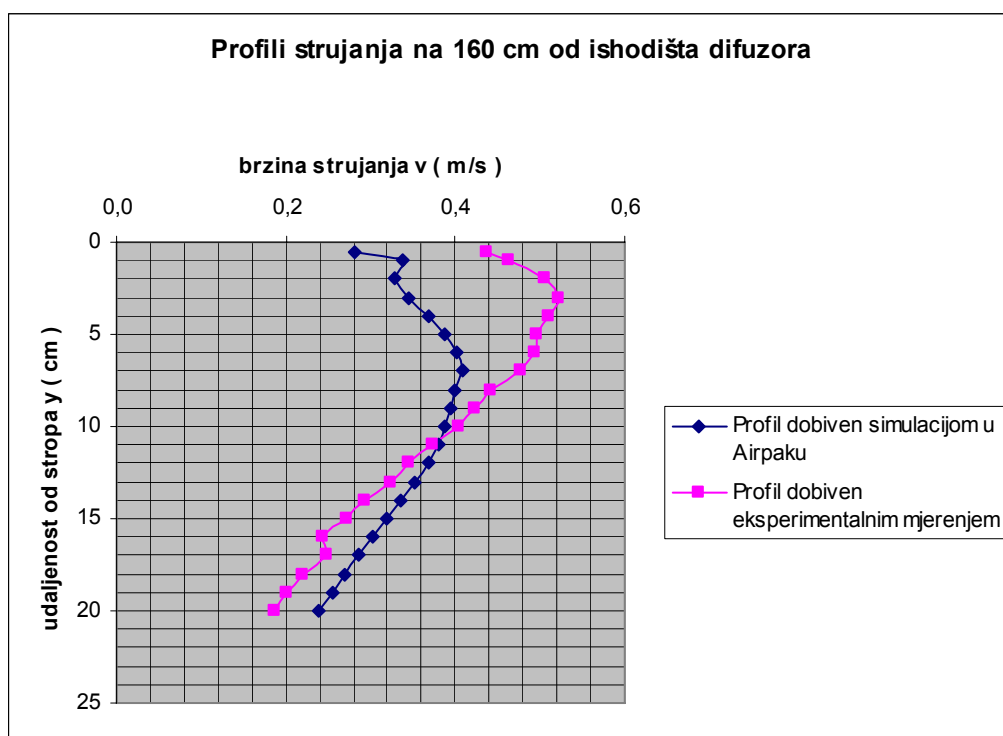
Slika 10. Profili strujanja na udaljenosti 100 cm od ishodišta difuzora



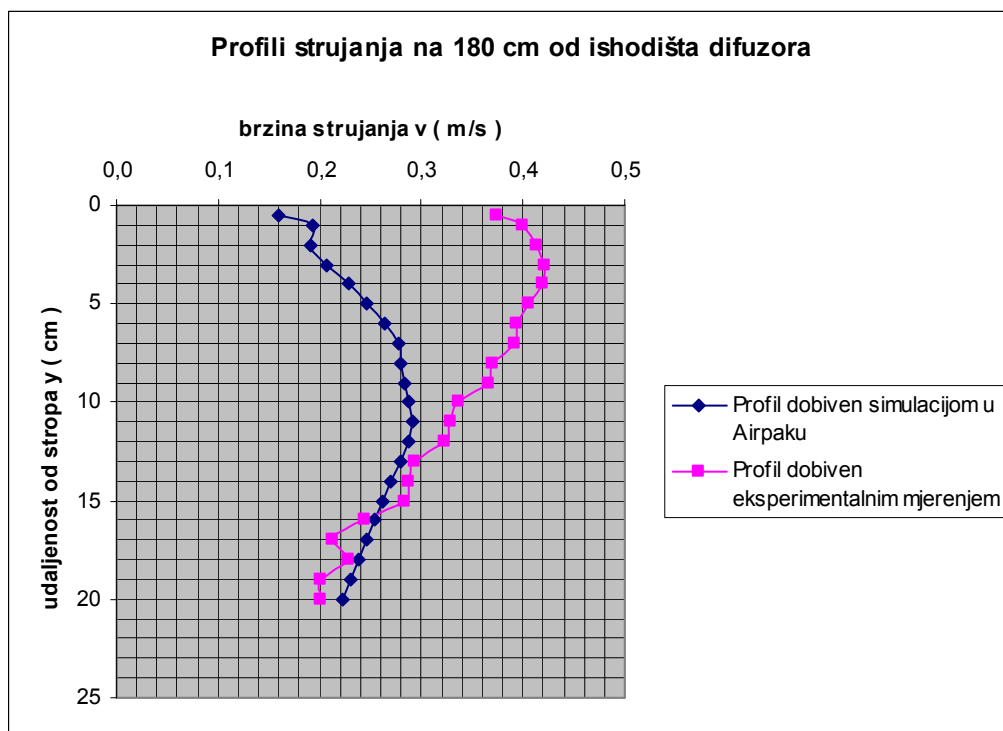
Slika 11. Profili strujanja na udaljenosti 120 cm od ishodišta difuzora



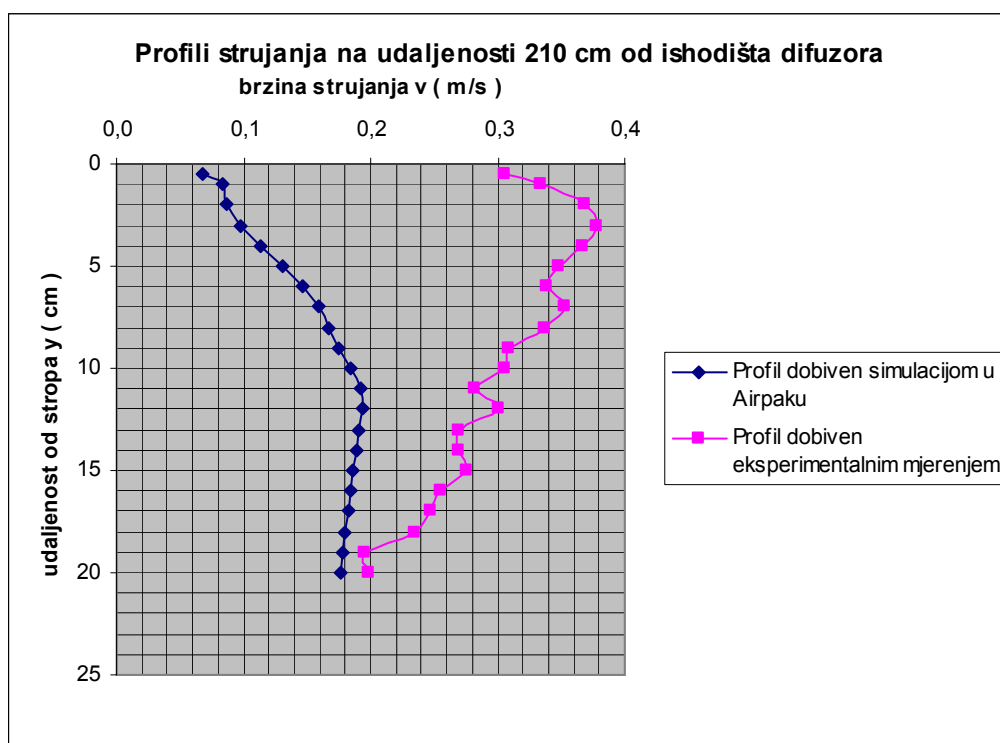
Slika 12. Profili strujanja na udaljenosti 140 cm od ishodišta difuzora



Slika 13. Profili strujanja na udaljenosti 160 cm od ishodišta difuzora



Slika 14. Profili strujanja na udaljenosti 180 cm od ishodišta difuzora



Slika 15. Profili strujanja na udaljenosti 210 cm od ishodišta difuzora

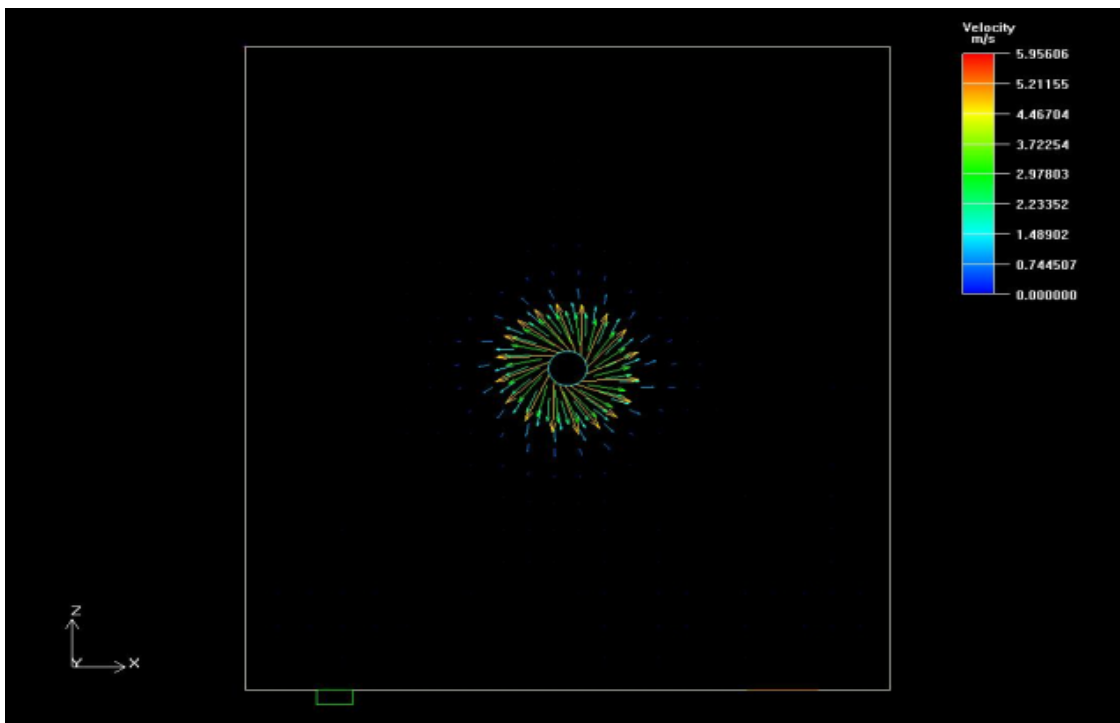
Na slikama 9, 10 i 11. vidi se da su profili mlaza dobiveni simulacijom i profili mlaza dobiveni eksperimentalno gotovo isti, s razlikom u iznosu maksimalne brzine koja je kod simulacijom dobivenog mlaza nešto veća nego kod eksperimentalno dobivenog mlaza i koja se kod simulacijom dobivenog mlaza pojavljuje otprilike 0.5 cm bliže stropu.

Udaljavajući se od ishodišta difuzora, profili se počinju sve više razlikovati, što se ozbiljnije počinje primjećivati na udaljenosti 140 cm od ishodišta difuzora. Na toj se udaljenosti iznosi brzina mjernih točaka oba profila značajnije razlikuju u odnosu na iznose brzina prethodno uspoređenih profila mlazova.

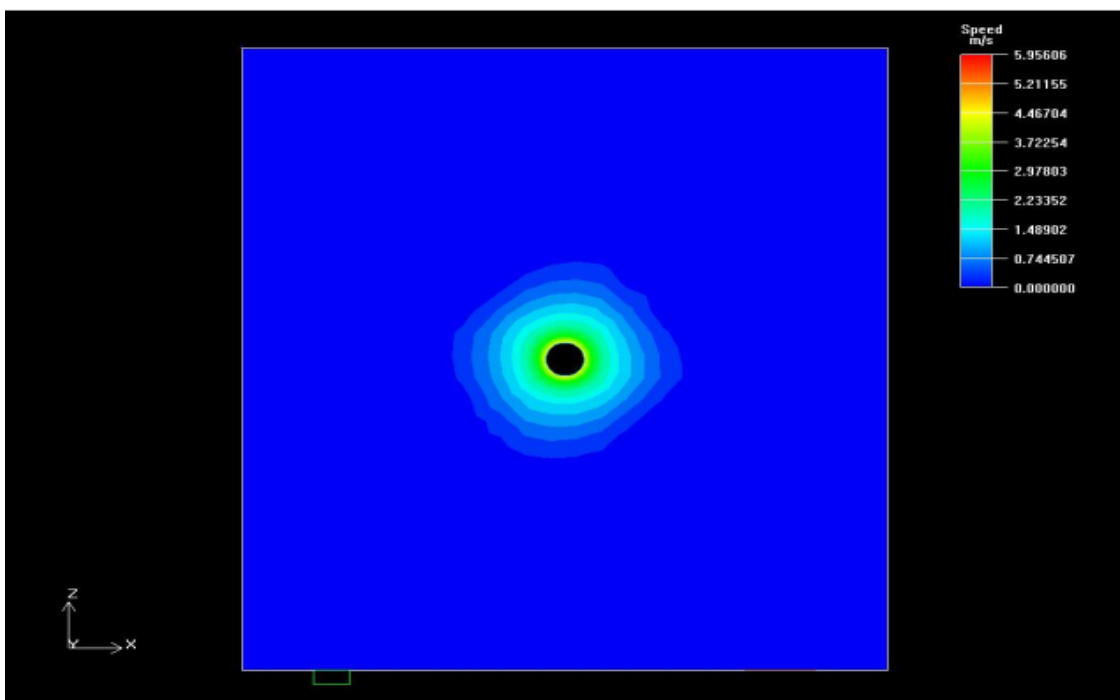
Daljnijim udaljavanjem od ishodišta difuzora sve je očitiji i odmak maksimalne brzine od stropa u profilu simulacijom dobivenog mlaza, dok se kod eksperimentalno dobivenog mlaza maksimalna brzina strujanja u profilu još uvijek pojavljuje uz strop. Eksperimentalno dobiveni mlaz zadržava približno isti profil i dalje struji uz strop, za razliku od simulacijom dobivenog mlaza koji se polako odvaja od stropa i čiji se profili povećanjem udaljenosti od ishodišta

difuzora sve više razlikuju od profila mlaza bližih ishodištu difuzora, ali i od profila eksperimentalno dobivenih mlazova na istim udaljenostima.

Slike 15. i 16. prikazuju kružni karakter simulacijom dobivenog mlaza.



Slika 16. Vektorski prikaz brzina mlaza na isturjnoj površini vrtložnog stropnog difuzora



Slika 17. Prikaz kontura brzina na isturjnoj površini vrtložnog stropnog difuzora

2. ANALIZA BRZINE STRUJANJA ZRAKA U ZONI BORAVKA SOBE ZA PREZENTACIJE

2.1. Osnove distribucije zraka u zatvorenim prostorima

Mehanička ventilacija predstavlja namjerno dovođenje određene količine vanjskog zraka u zatvoreni prostor kroz za tu svrhu projektirane otvore.

Zadatak sustava ventilacije je dovođenjem vanjskog zraka u zatvoreni prostor uklanjati toplinu i vlagu uz razrjeđivanje (ili otklanjanje) koncentracije zagađivača te uspostavljanje željene razdiobe zraka u prostoriji.

Prema načinu distribucije zraka u prostoriji sustavi ventilacije dijele se na:

1. Sustave s poprečnim strujanjem
2. Sustave s miješajućim strujanjem

Budući da je soba za prezentacije ventilirana vrtložnim stropnim difuzorima koji osiguravaju miješajuće strujanje zraka u prostoriji, u nastavku će biti navedene osnovne značajke sustava s miješajućim strujanjem.

2.1.1. Osnove sustava s miješajućim strujanjem

Dobavni zrak, uz nužan udio vanjskog zraka, se u prostoriju ubacuje velikom količinom gibanja, tj. s dosta većim brzinama od onih koje su dopuštene u zoni boravka. Miješanje dobavnog zraka s postojećim zrakom u prostoriji se osigurava indukcijom, pri čemu se smanjuje brzina strujanja dobavnog zraka i osiguravaju ravnomjerne brzine strujanja zraka u prostoriji. Miješanjem dobavnog sa zrakom iz prostorije se također ujednačuju temperatura i kvaliteta zraka u zoni boravka.

Temperatura dobavnog zraka može biti iznad, ispod ili jednaka temperaturi zraka u prostoriji, ovisno o tome grijemo li, hladimo ili ventiliramo prostoriju.

Budući da je pretpostavljeno da se prostorija hladi principom slobodnog hlađenja, u idućoj točki će se navesti značajke vrtložnih stropnih difuzora u režimu hlađenja.

2.1.2. Vrtložni stropni difuzori u režimu hlađenja

Ukupna količina zraka koja u režimu hlađenja na nekoj udaljenosti od istrujne površine difuzora ulazi u zonu boravka ovisi o : protočnom volumenu dobavnog zraka, efektivnoj brzini istrujavanja, temperaturnoj razlici između dobavnog zraka i zraka u prostoriji, postavkama otklona, utjecaju stropa i vrsti toplinskog opterećenja u prostoriji.

Korištenjem vrtložnih stropnih difuzora temperaturne razlike u zoni boravka su svedene na minimum, uz minimalnu zonu stagnacije. Maksimalne razlike u brzini strujanja zraka i maksimalne temperaturne razlike se pojavljuju u ukupnoj količini zraka. Iz tog razloga bi trebalo voditi računa o mjestu propadanja mlaza, jer je to područje visokih efektivnih temperatura puhanja koje mogu dovesti do pojave propuha.

Iz vrtložnih stropnih difuzora zrak se ubacuje horizontalno u prostoriju pa se najtopliji zrak iz prostorije neposredno nakon ubacivanja dobavnog hladnijeg zraka indukcijom miješa s primarnim zrakom dovoljno visoko iznad zone boravka. Zbog toga su vrtložni stropni difuzori pogodni za korištenje većih količina zraka pri većim temperaturnim razlikama između dobavnog zraka i zraka u prostoriji. Povećanjem temperaturne razlike između dobavnog i zraka u prostoriji propadanje mlaza se povećava, a domet smanjuje. Za konstantnu temperaturnu razliku protok ima veći utjecaj na propadanje mlaza, nego brzina strujanja pa bi se zbog toga u prostoriju trebalo postaviti više manjih difuzora.

2.2. Ventilacijski zahtjevi sobe za prezentacije

Dva su ventilacijska zahtjeva koja moraju biti zadovoljena u sobi za prezentacije ventiliranoj četirima vrtložnim stropnim difuzorima koji u prostoriju ubacuju 100 % vanjski zrak temperature 17°C i relativne vlažnosti 60%. To su:

1. Ventilacijski zahtjev prema broju izmjena zraka na sat (ACH)
2. Ventilacijski zahtjev prema broju osoba

2.2.1. Ventilacijski zahtjev prema minimalnom broju izmjena zraka na sat

Broj izmjena zraka na sat ACH (eng. Air Changes per Hour) je omjer protočnog volumena vanjskog zraka q_V koji u jednome satu uđe u prostoriju volumena V :

$$ACH = \frac{q_V}{V} \left[h^{-1} \right] \quad (12)$$

Ventilacijski zahtjev prema broju izmjena zraka na sat ovisi o vrsti i namjeni prostorije te aktivnostima koje ljudi obavljaju u prostoriji. Provodi se kada nije poznat izvor zagađivača u prostoriji, što je u sobi za prezentacije slučaj.

Broj izmjena zraka na sat za različite tipove prostorije podatak je koji se može naći u stručnoj literaturi, a za uobičajene stambene i poslovne prostore uzima se u rasponu od $4 - 8 \cdot h^{-1}$

Iskustveni broj izmjena zraka na sat za prostore različite namjene			
Vrsta prostora	ACH	h^{-1}	
Ured	3 - 6		
Knjižnica	3 - 5		
Restoran	6 - 8		
Dućan	4 - 8		
Kazalište, kino dvorana	4 - 6		
Lakirnica	20 - 50		
Opreacijska dvorana	15 - 20		
Skladište	4 - 6		
Garderoba	3 - 6		
Zatvoreni bazen	3 - 6		
Laboratorij	8 - 15		

Tablica 4. Iskustveni brojevi izmjena zraka na sat za prostore različite namjene^[7]

Određeni minimum kojega je nužno osigurati u sobi za prezentacije iznosi $ACH = 12 \cdot h^{-1}$. Provjerit će se zadovoljava li ukupno ubačeni volumni protok vanjskog zraka iz vrtložnih stropnih difuzora zadanom kriteriju od 12 izmjena zraka na sat.

Soba za prezentacije sljedećih je dimenzija:

- duljina : $l = 10 \cdot \text{m}$

- širina : $b = 9 \cdot \text{m}$

- visina : $h = 3 \cdot \text{m}$

Prema tome, ukupni volumen prostorije iznosi:

$$V = l \cdot b \cdot h$$

$$V = 10 \cdot 9 \cdot 3$$

$$V = 270 \cdot \text{m}^3$$

Dobavni zrak za ventiliranje sobe za prezentacije ubacuje se u prostoriju četirima vrtložnim stropnim difuzorima jednakih volumnih protoka zraka:

$$q_{V1} = 870 \cdot \text{m}^3/\text{h}$$

Ukupna količina zraka ubačenog u prostoriju iznosi:

$$q_V = 4 \cdot q_{V1}$$

$$q_V = 4 \cdot 870$$

$$q_V = 3480 \cdot \text{m}^3/\text{h}$$

Broj izmjena zraka na sat kojeg ćemo ostvariti s izračunatim protočnim volumenom vanjskog zraka u sobi za prezentacije iznosi:

$$ACH = \frac{q_V}{V}$$

$$ACH = \frac{3480}{270}$$

$$ACH = 12.89 \cdot \text{h}^{-1}$$

Budući da je ostvarivi broj izmjena zraka na sat $ACH = 12.89 \cdot \text{h}^{-1}$ veći od zadanog minimalnog broja izmjena zraka na sat $ACH = 12 \cdot \text{h}^{-1}$, tj. $12.89 \cdot \text{h}^{-1} > 12 \cdot \text{h}^{-1}$, ventilacijski je zahtjev prema broju izmjena zraka na sat zadovoljen.

2.2.2. Ventilacijski zahtjev prema broju osoba u prostoriji

Drugi ventilacijski zahtjev kojeg je nužno osigurati je ventilacijski zahtjev prema broju osoba koje borave u zatvorenom prostoru. Najmanja dozvoljena količina vanjskog zraka koja predstavlja higijenski minimum vanjskog zraka po osobi i satu iznosi:

$$V_{o.p.} = 30 \cdot \text{m}^3/\text{h}$$

Drugim riječima, u prostorijama u kojima borave ljudi, a u kojima je zabranjeno pušenje, nužno je osigurati dobavu vanjskog zraka od nešto više od 8 litara po jednoj osobi i jednoj sekundi.

Dobava vanjskog zraka po osobi i satu ovisi o vrsti aktivnosti koju ljudi obavljaju u zatvorenom prostoru, a prema preporuci u literaturi^[7] dobava vanjskog zraka koja će zadovoljiti 90% prisutnih u uobičajenim stambenim i poslovnim prostorima iznosi $V_{o.p.} = 30 - 60 \cdot \text{m}^3/\text{h} \cdot \text{osoba}$

Soba za prezentacije predviđena je boravku 50 ljudi kojima je potrebno osigurati minimalnu dobavu vanjskoga zraka $V_{o.p.} = 50 \cdot \text{m}^3/\text{h} \cdot \text{osoba}$

Vrtložnim stropnim difuzorima se u prostoriju ubacuje ukupni volumen vanjskog zraka $q_V = 3480 \cdot \text{m}^3/\text{h}$, a prema jednadžbi za n osoba koje borave u sobi za prezentacije najmanja količina dobavnog vanjskog zraka q_{V0} iznosi:

$$\begin{aligned} q_{V0} &= n \cdot V_{o.p.} \\ q_{V0} &= 50 \cdot 50 \\ q_{V0} &= 2500 \cdot \text{m}^3/\text{h} \end{aligned} \tag{13}$$

Dakle, u sobi za prezentacije biti će zadovoljen i ventilacijski kriterij prema broju osoba u prostoriji, jer je ukupna dobava vanjskog zraka $q_V = 3480 \cdot \text{m}^3/\text{h}$ koja se ubacuje u prostoriju veća od najmanje količine dobavnog vanjskog zraka za 50 osoba $q_{V0} = 2500 \cdot \text{m}^3/\text{h}$.

2.3. Modeliranje toplinskih rubnih uvjeta objekata u prostoriji

Da bi se simulacijom dobila slika distribucije temperature zraka u zoni boravka sobe za prezentacije, prije toga je potrebno definirati toplinske rubne uvjete objektima u prostoriji. Budući da je rad zamišljen prvenstveno kao analiza utjecaja brzine strujanja zraka pri proračunu parametra za ocjenu osjećaja propuha, modeliranje toplinskih rubnih uvjeta objekata u prostoriji je pojednostavljeno. Zbog navedenog pojednostavljenja, podatke dobivene simulacijom ne treba shvatiti kao stvarne vrijednosti brzine strujanja i temperature zraka, već kao vrijednosti koje će poslužiti u svrhu određivanja lokacija unutar zone boravka na kojima postoji mogućnost pojave propuha. Pri modeliranju toplinskih rubnih uvjeta pretpostavljeno da su svi zidovi, pod i strop unutarnji te da je kroz njih prolaz topline zanemariv, jednako kao i kroz vrata i katedru. Izvore topline u prostoriji predstavljaju 50 osoba i fluorescentna rasvjeta instalirane električne snage 2.5 kW.

2.3.1. Modeliranje toplinskih rubnih uvjeta kod ljudi

Airpak nudi tri opcije za modeliranje toplinskih rubnih uvjeta kod ljudi :

1. Definiranjem razine tjelesne aktivnosti u Met-ima
2. Određivanjem ukupnog iznosa topline koja osoba predaje okolini u [W]
3. Zadavanjem fiksne temperature osobi u [°C]

Pri modeliranju toplinskih rubnih uvjeta kod ljudi definirana je razina tjelesne aktivnosti. Osobe koje borave u sobi za prezentacije gotovo da i ne obavljaju nikakvu tjelesnu aktivnost, već miruju u sjedećem položaju iz kojeg promatraju prezentacije pa je tjelesna aktivnost osoba u prostoriji definirana s 1 Met.

Met je jedinica razine tjelesne aktivnosti, tj. metaboličkog učinka organizma i po definiciji iznosi $1 \cdot \text{Met} = 58 \cdot \text{W/m}^2$. Prosječna površina kože kod odraslog čovjeka iznosi oko 1.8 m^2 pa je prema tome iznos topline koju čovjek preda okolini pri razini aktivnosti od 1 Met otprilike $\Phi_{o1} = 105 \cdot \text{W}$.

Kada procjenjujemo razinu metaboličke aktivnosti organizma bitno je uzeti u obzir sve aktivnosti koju je osoba vršila unazad jednoga sata i na temelju njih odrediti prosječnu vrijednost metaboličkog učinka organizma. Razlog tomu je što toplinski kapacitet tijela pamti naše aktivnosti otprilike jedan sat nakon što smo ih obavili. Za različite aktivnosti tablično su prikazane vrijednosti Met-a.

Vrijednosti metaboličkog učinka u ovisnosti o razini tjelesne aktivnosti		
Razina tjelesne aktivnosti	Metabolički učinak	
	W/m²	Met
Odmaranje (spavanje)	46	0.8
Mirno sjedenje	56	1.0
Rad za računalom	65	1.1
Mirno stajanje	70	1.2
Vožnja automobila	60-115	1.0 - 2.0
Stanjanje uz laganu aktivnost	93	1.6
Šetnja	100	1.7
Obavljanje kućanskih poslova	116	2.0
Teški tjelesni rad za strojem	235	4.0
Športska aktivnost	550	9.5

Tablica 5. Vrijednosti metaboličkog učinka u ovisnosti o razini tjelesne aktivnosti^[5]

Ukupno predana toplina prostoriji od 50 osoba iznosi:

$$\Phi_{no} = n \cdot \Phi_{o1}$$

$$\Phi_{no} = 50 \cdot 105$$

$$\Phi_{no} = 5250 \cdot W$$

2.3.2. Modeliranje toplinskih rubnih uvjeta kod rasvjete

Za rasvjetu će se pretpostaviti da je ukupna instalirana električna snaga jednaka ukupno predanoj toplini prostoriji pa će tako ukupna količina predane topline od fluorescentne rasvjete iznositi:

$$\Phi_r = 2500 \cdot W$$

2.3.3. Provjera vrijednosti toplinskih tokova predanih prostoriji

Za pretpostavljenu temperaturu prostorije pri kojoj su provedene CFD simulacije strujanja zraka uzeta je temperatura zraka od 24°C, budući da je to temperatura zraka koja se obično održava u sobama za prezentacije i prostorijama sličnog karaktera.

Kako je već prije u radu navedeno, u zadatku je naglasak na utjecaju strujanja zraka na osjećaj ugodnosti osoba koje borave u prostoriji pa nije bilo potrebno provesti proračun toplinskog opterećenja prostorije. Razlog tome je i činjenica da su podaci o parametrima mlaza potrebni za modeliranje rubnih uvjeta istrujavanja zraka iz vrtložnih stropnih difuzora dobiveni eksperimentalnim mjerenjem u laboratoriju Klimaoprema d.d. za difuzore protoka $q_{V1} = 870 \cdot \text{m}^3/\text{h}$, čiji ukupni volumni protok dobavnog zraka $q_V = 3480 \cdot \text{m}^3/\text{h}$ zadovoljava ventilacijske zahtjeve koje je nužno osigurati (točke 2.1.1. i 2.1.2).

Unatoč tome, CLTD metodom provjerit će se točnost toplinskih tokova koje ljudi i rasvjeta predaju prostoriji, uz pretpostavku da se u prostoriji održavaju prezentacije u periodu od 8 – 16 h. Također je pretpostavljeno da je ukupno instalirana fluorescentna rasvjeta cijelo vrijeme uključena te da su ljudi cijelo vrijeme u prostoriji.

2.3.3.1. Rashladno opterećenje od ljudi

Odavanje topline ljudi ovisi o individualnim značajkama pojedinca kao što su dob, spol, zdravlje, razina tjelesne aktivnosti i dr. Odana toplina prostoriji javlja se kao latentna toplina koju osoba predaje okolini ishlapljivanjem preko kože i disanjem. Ona predstavlja trenutni dobitak topline prostorije. Osjetna toplina se okolini predaje konvekcijom i zračenjem, pri čemu 70 % ukupno predane osjetne topline otpada na zračenje, a preostalih 30 % na konvekciju. Osjetnu toplinu predanu zračenjem apsorbiraju pod, strop i zidovi i s određenim vremenskim pomakom ju predaju prostoriji pri čemu ona prelazi u toplinsko opterećenje prostorije^[6].

U radu je modeliranje toplinskih rubnih uvjeta poda, stropa i zidova pojednostavljeno pa će tako i srednja temperatura zračenja biti uzeta jednaka pretpostavljenoj temperaturi zraka u prostoriji, dakle 24°C, te će se zanemariti debljina svih zidova, poda i stropa.

Pri određivanju faktora CLF (eng. Cooling Load Factor) rashladnog opterećenja ljudi pretpostavljeno je vrijeme ulaska ljudi u prostoriju u 8 h. Pretpostavljeno vrijeme zadržavanja ljudi u prostoriji također je 8 h, a najveće rashladno opterećenje prostorije uslijed odavanja osjetne topline od ljudi javit će se u 8 satu boravka kada faktor rashladnog opterećenja iznosi:

$$CLF = 0.84$$

Za iznos osjetne topline koju osoba predaje prostoriji uzeto je:

$$\phi_{os1} = 70 \cdot W$$

Rashladno opterećenje uslijed odavanja osjetne topline od ljudi računa se prema sljedećem izrazu i iznosi:

$$\phi_{os} = n \cdot \phi_{os1} \cdot CLF \quad (14)$$

$$\phi_{os} = 50 \cdot 70 \cdot 0.85$$

$$\phi_{os} = 2940 \cdot W$$

Za iznos latentne topline koju osoba predaje prostoriji uzeta je vrijednost:

$$\phi_{lat1} = 35 \cdot W$$

Rashladno opterećenje uslijed odavanja latentne topline od ljudi računa se prema sljedećem izrazu i iznosi:

$$\phi_{lat} = n \cdot \phi_{lat1} \quad (15)$$

$$\phi_{os} = 50 \cdot 35$$

$$\phi_{os} = 1750 \cdot W$$

Ukupno rashladno opterećenje prostorije uslijed odavanja topline od ljudi jednako je zbroju ukupno predane osjetne i latentne topline i iznosi:

$$\phi_{uk} = \phi_{os} + \phi_{lat} \quad (16)$$

$$\phi_{uk} = 2940 + 1750$$

$$\phi_{uk} = 4690 \cdot W$$

2.3.3.2. Rashladno opterećenje od rasvjete

Instalirana snaga rasvjete u cijelosti se pretvara u toplinu i prenosi na okolni prostor zračenjem i konvekcijom. Dio topline koji fluorescentna rasvjeta konvektivno predaje zraku u prostoriji izravno prelazi u toplinsko opterećenje prostorije, dok dio topline predan zračenjem zidovima i objektima u prostoriji s određenim vremenskim pomakom prelazi u toplinsko opterećenje prostorije^[6].

Kako je prije navedeno, modeliranje toplinskih rubnih uvjeta zidova je znatno pojednostavljeno pa se ne može tvrditi da je proračun rashladnog opterećenja u potpunosti točan, no može poslužiti kao orijentacija za usporedbu s otprije definiranim toplinskim rubnim uvjetom rasvjete.

Za određivanje trenutnog dobitka topline potrebi su nam sljedeći podaci o rasvjeti:

- ukupna instalirana snaga rasvjete:

$$P_{el} = 2.5 \cdot kW$$

- faktor upotrebe rasvjete (odnos uključene prema isključenoj rasvjeti)

$$f_u = 1$$

- faktor vrste rasvjete koji za fluorescentnu rasvjetu iznosi:

$$f_o = 1.2$$

Uz prethodno određene parametre, trenutni dobitak topline računa se prema sljedećem izrazu:

$$\Phi' = P_{el} \cdot f_u \cdot f_o \quad (17)$$

$$\Phi' = 2500 \cdot 1 \cdot 1.2$$

$$\Phi' = 3000 \cdot W$$

Vremenski pomak i raspored toplinskog opterećenja uslijed trenutnog dobitka topline od rasvjete ovisi o izboru parametara a i b.

Parametar a ovisi o:

- opremi prostorije
- razmještaju distributera dobavnog zraka i odsisnog otvora
- broju izmjena zraka na sat
- načinu ugradnje rasvjete.

U sobi za prezentacije pretpostavljeno je sljedeće:

- u prostoriji je običan namještaj bez saga
- rasvjeta je ugrađena u strop bez posebne ventilacije rasvjetnog tijela
- dovod i odvod zraka smješteni su ispod ili u stopu uz srednji ili veći broj izmjena zraka na sat

Na temelju navedenih pretpostavki odabrana vrijednost parametra a iznosi:

$$a = 0.55$$

Parametar b ovisi o tipu konstrukcije poda pa je pretpostavljeno da je pod betonske konstrukcije debljine 150 mm, uz veliki broj izmjena zraka na sat.

Parametar b će tada iznositi:

$$b = C$$

Kada su nam poznati parametri a i b za rasvjetu je moguće odrediti faktor rashladnog opterećenja CLF. Uz pretpostavku da je rasvjeta uključena 8 sati, najveće rashladno opterećenje bit će u osmom satu uključenosti rasvjete kad će faktor CLF iznositi:

$$CLF = 0.76$$

Uz poznati faktor CLF za rasvjetu može se izvršiti proračun rashladnog opterećenja prema jednadžbi:

$$\Phi = \Phi' \cdot CLF \tag{18}$$

$$\Phi = 3000 \cdot 0.76$$

$$\Phi = 2280 \cdot W$$

Rezultati dobiveni točkama 2.3.3.1. i 2.3.3.2. nam pokazuju da su iznosi toplinskih tokova koji su korišteni prilikom modeliranja toplinskih rubnih uvjeta pri CFD simulaciji strujanja zraka u prostoriji nešto veći od iznosa topline dobivenih CLTD metodom. To znači da se u slučaju provođenja proračuna potrebne količine zraka za pokrivanje rashladnog opterećenja prostorije ne bi postigla temperatura prostorije od 24°C, već bi temperatura u prostoriji bila niža.

2.4. Analiza brzine strujanja i temperaturne distribucije zraka u zoni boravka

2.4.1. Definiranje zone boravka

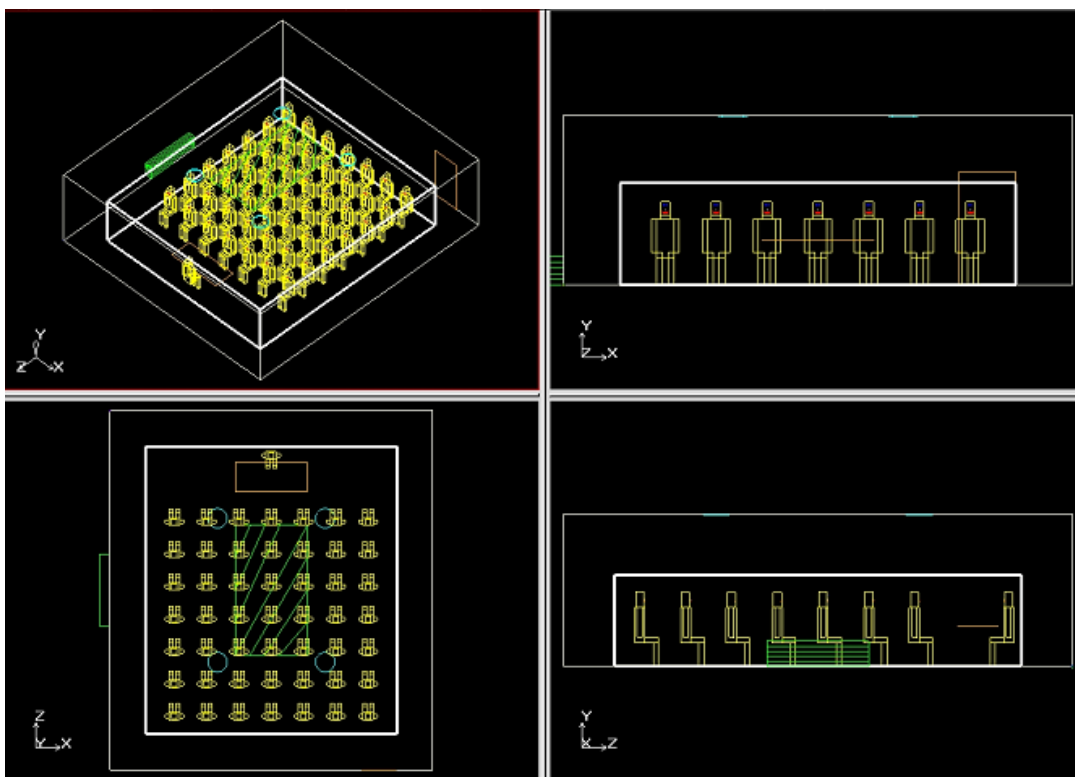
Prije analize brzine strujanja zraka u zoni boravka sobe za prezentacije nužno je definirati dimenzije zone boravka prostorije u kojoj će se promatrati brzine strujanja zraka. Budući da je pretpostavljeno da su svi zidovi, pod i strop unutarnji, položaj zone boravka određen je tako da udaljenost svih zidova od zone boravka bude 1 m. Zona boravka je standardne visine od 1.8 m.

Soba za prezentacije predviđena je boravku 50 ljudi pa je nužno svakoj osobi osigurati prostor za sjedenje površine $0.7 \cdot \text{m}^2$ do $0.9 \cdot \text{m}^2$. Radi brže i jednostavnije provedbe simulacije, stolice nisu ucrtane u Airpak, ali su osobe postavljene u sjedeći položaj tako da je postignut dojam da svi u prostoriji sjede. Osobe, koje su postavljene na mjesta predviđena sudionicima prezentacija raspoređene su u sedam redova po duljini prostorije. U svakome redu se nalazi sedam prostora za sjedenje, dok je osoba koja je postavljena na mjesto predviđeno "predavaču", licem okrenuta prema "sudionicima" prezentacije u sjedećem položaju uz "katedru"

Fluorescentna rasvjeta instalirane električne snage $P = 2.5 \cdot \text{kW}$ ugrađena je u strop na sredini prostorije, odnosno zone boravka i površine je $7.2 \cdot \text{m}^2$, a četiri vrtložna stropna difuzora simetrično su postavljena na međusobnoj udaljenosti 3 m po širini te 4 m po duljini prostorije.

Odsis povratnog zraka pravokutnog je oblika i postavljen je nisko pri podu tako da nema značajan utjecaj na distribuciju brzine strujanja, odnosno temperature zraka u zoni boravka.

Radi što vjernijeg prikaza sobe za prezentacije ucrtana su i vrata na zidu iza leđa "sudionika" prezentacija.



Slika 18. Prikaz sobe za prezentacije u sve tri projekcije i izometriji

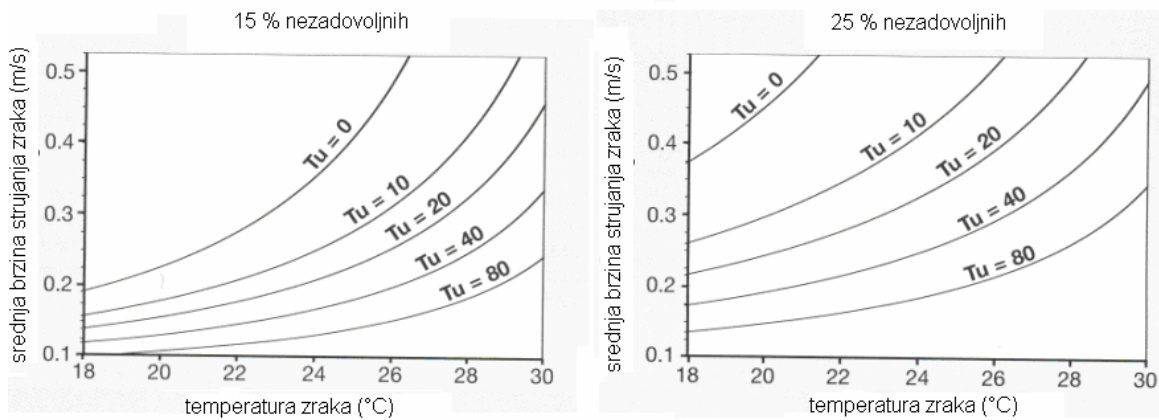
2.4.2. Intenzitet turbulencije

Intenzitet turbulencije nam ukazuje na fluktuacije, tj. promjenjivost brzine strujanja zraka u vremenu i po definiciji je jednak omjeru standardne devijacije brzine strujanja zraka SD i srednje lokalne brzine strujanja w_a u promatranoj točki^[5]:

$$T_u = 100 \cdot \frac{SD}{w_a} [\%] \quad (19)$$

Pri dimenzioniranju sustava nastoji se osigurati što jednoličnija brzina strujanja u prostoru, jer veći intenziteti turbulencije uzrokuju veći osjećaj nelagode, iako je izmijenjena toplina između osobe i okoline u oba slučaja jednaka.

Donja dva dijagrama pokazuju utjecaj intenziteta turbulencije na postotak nezadovoljnih uslijed pojave propuha. Iz njih se može zaključiti kako će pri jednakim intenzitetima turbulencije i jednakim temperaturama zraka, biti veći postotak nezadovoljnih uz veće srednje brzine strujanja zraka u zoni boravka.



Slika 19. Utjecaj intenziteta turbulencije na postotak nezadovoljnih uslijed pojave propuha^[5]

Prema ASHRAE standardu 55 preporučene brzine strujanja u zoni boravka ne bi smjele prelaziti 0.25 m/s, dok donja granica brzina strujanja zraka nije definirana, iako se brzine strujanja ispod 0.1 m/s ne mogu osjetiti^[2].

2.4.3. Parametar za ocjenu osjećaja propuha PD

Propuh je svaki osjećaj hladnoće ili topline na bilo kojem nepokrivenom dijelu tijela koji je uzrokovan strujanjem zraka i temperaturom. Čovjek ne može osjetiti brzinu strujanja zraka, već je ono što osjećamo neželjeno lokalno hlađenje tijela. Propuh, tj. toplinski gubitak dijela tijela izloženog propuhu, ovisi o brzini strujanja zraka, turbulenciji i temperaturi zraka, odnosno o međusobnoj kombinaciji navedena tri parametra koja različitim međusobnim odnosima izazivaju osjećaj nelagode. Sva tri faktora koja utječu na pojavu propuha obuhvaćena su jednadžbom za vrednovanje osjećaja propuha PD ^[7]:

$$PD = (34 - t_a) \cdot (w_a - 0.05)^{0.6223} \cdot (0.3696 \cdot w_a \cdot T_u + 3.143) \quad (20)$$

Gornja jednadžba u kojoj je intenzitet turbulencije izražen jednadžbom (19) sljedećeg je oblika^[5]:

$$PD = (34 - t_a) \cdot (w_a - 0.05)^{0.6223} \cdot (0.37 \cdot SD + 3.14) \quad (21)$$

Ako je brzina strujanja u mjernoj točki:

$w_a < 0.05 \cdot \text{m/s}$, tada se za vrijednost brzine strujanja zraka uzima $w_a = 0.05 \cdot \text{m/s}$ pa će u tom slučaju PD biti jednak nuli.

Prema ISO 7730 standardu vrijednost parametra PD u razini gležnjeva i vrata trebala bi biti manja od 15% da bi se moglo reći da je postotak nezadovoljnih uslijed pojave propuha zadovoljavajući.

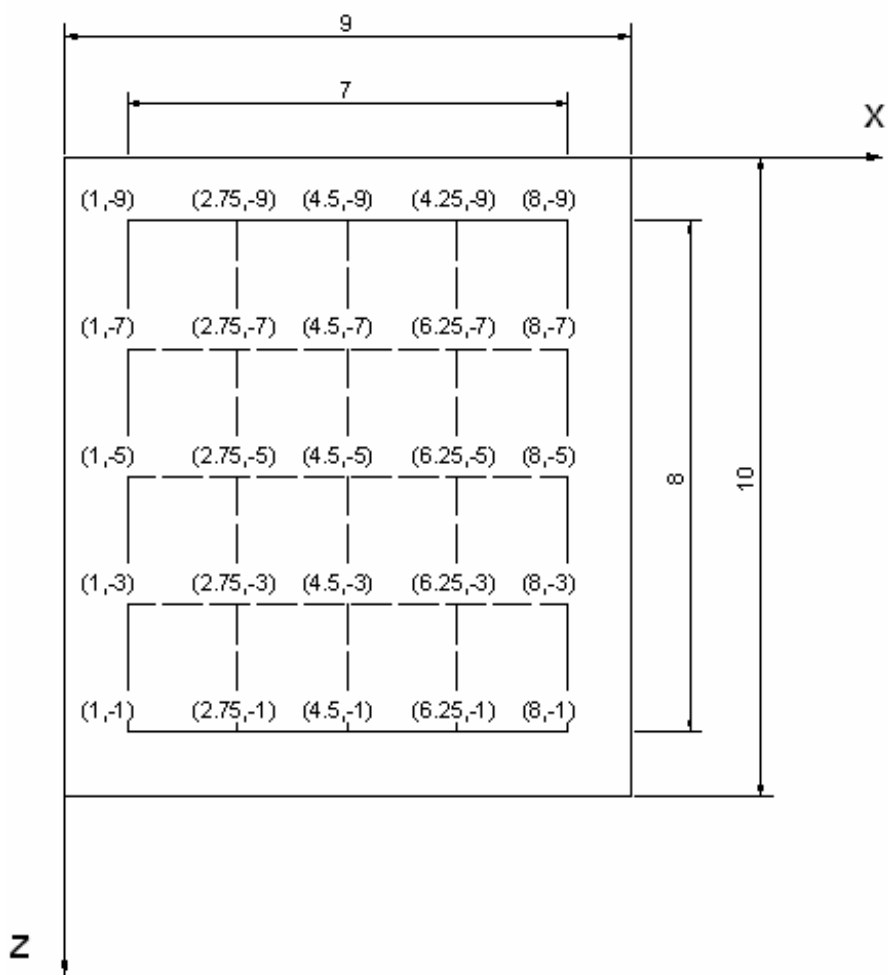
Ravnine u kojima je bilo potrebno ispitati PD su paralelne su i redom udaljene 10, 110 i 180 cm od poda. Za tu je potrebu napravljena mreža od 25 točaka u svakoj od navedene tri ravnine na kojima će biti proveden proračun PD parametra i koja će nam dati brojčani podatak o predviđenom postotku nezadovoljnih osoba uslijed pojave propuha.

2.4.4. Analiza brzine strujanja zraka u zoni boravka

Analiza brzine strujanja zraka u zoni boravka sobe za prezentacije provedena je usporedno s proračunom parametra za ocjenu postotka nezadovoljnih osoba uslijed pojave propuha PD (eng. Percentage of people dissatisfied by drought).

Proračun parametra PD proveden je na uzorku od 25 točaka zone boravka u tri ravnine paralelne podu i od poda udaljene redom 10 , 110 i 180 cm.

Iznosi brzine strujanja i temperature zraka u mjernim točkama, kao i standardna devijacija brzine strujanja, dobiveni su nakon što je u komercijalnom CFD software-u Airpak Fluent-u provedena simulacija, uz pretpostavku temperature zraka u prostoriji od 24°C i uz pretpostavku kako su pod, zidovi i stop unutarnji te da je kroz njih prolaz topline zanemariv.



Slika 20. Dijagramski prikaz rasporeda 25 točaka po ravninama u kojima se provodi proračun PD parametra

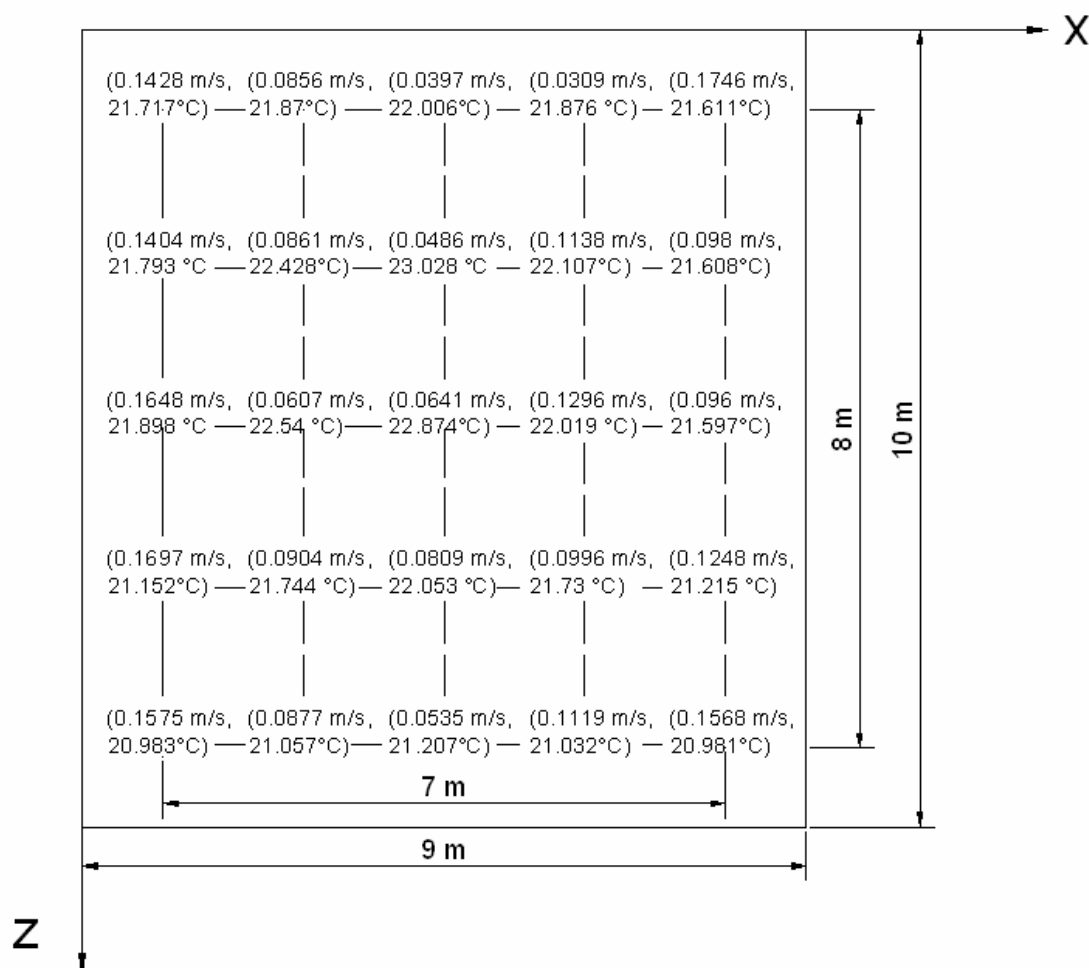
Iznosi brzina strujanja i temperatura zraka pridruženih svakoj od 25 točaka ravnina udaljenih 10, 110 i 180 cm od poda biti će prikazani slikama kao što je slika 20, a njihove će vrijednosti biti iskorištene za proračun parametra PD , koji će biti tablično prikazan u nastavku rada.

Prilikom proračuna PD -a korištena je jednačba:

$$PD = (34 - t_a) \cdot (w_a - 0.05)^{0.6223} \cdot (0.37 \cdot SD + 3.14)$$

Prije proračuna parametra PD valja istaknuti kako maksimalna brzine strujanja zraka u zoni boravka nigdje ne prelazi 0.25 m/s, a najveća brzina strujanja koju je Airpak pronašao u zoni boravka iznosi $w_{\max} = 0.236639 \cdot \text{m/s}$.

2.4.4.1. Proračun PD-a u ravlini udaljenoj 10 cm od poda



Slika 21. Dijagramski prikaz iznosa brzina i temperatura u točkama ravnine udaljene 10 cm od poda

U ravlini udaljenoj 10 cm od poda simulacijom dobivena vrijednost SD iznosi $SD = 0,0489$ m/s.

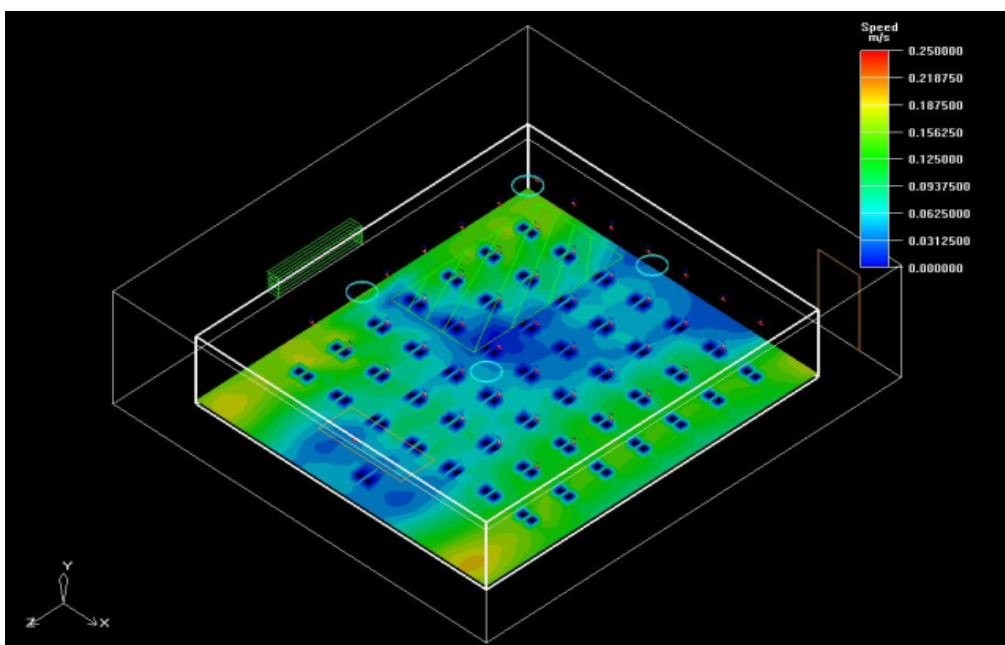
Iznos parametra PD u točkama ravnine udaljene 10 cm od poda					
	x=1 m	x=2.75m	x=4.5 m	x=6.25m	x=8 m
z=-9 m	8,890	4,844	0	0	10,767
z=-7 m	8,694	4,664	0	6,823	5,962
z=-5 m	9,999	2,178	2,500	7,885	5,815
z=-3 m	10,894	5,299	4,373	6,023	8,099
z=-1 m	10,325	5,356	1,224	7,307	10,286

Tablica 6. Vrijednosti parametra PD u točkama ravnine udaljene 10 cm od poda

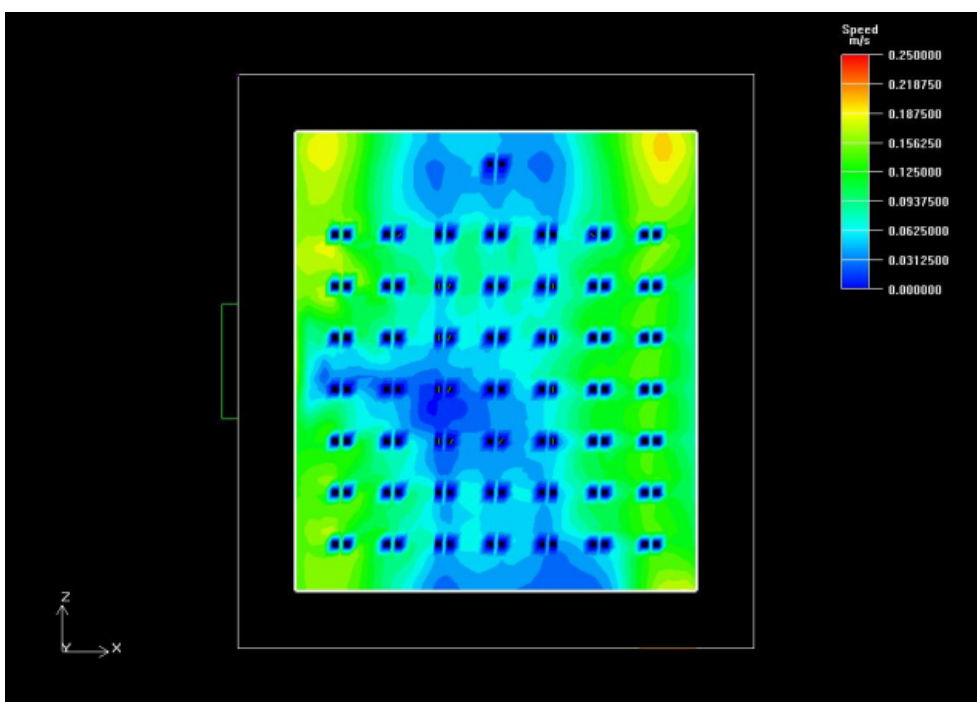
2.4.4.2. Analiza distribucije brzine strujanja i temperature zraka u ravnini udaljenoj 10 cm od poda

Iz slike 21 i tablice 6 vidimo da je postotak nezadovoljnih u ravnini udaljenoj 10 cm od poda veći u rubnom području zone boravka gdje su veće brzine strujanja i nešto niže temperature zraka u odnosu na unutrašnjost ravnine. U rubnim dijelovima zone boravka nema ljudi i njihov je utjecaj na distribuciju brzine strujanja i temperature zraka manji nego u unutrašnjosti zone boravka pa brzine strujanja zraka dostižu i do 0.2 m/s, a temperature su niže od onih u sredini zone boravka. To se prvenstveno odnosi na dio ravnine u kutovima iza katedre, što je prikazano slikama 24 i 25. Taj podatak se može protumačiti činjenicom da je u unutrašnjosti zone boravka (točke (2,75,-5) i (4,5,-5)) veća koncentracija ljudi i jači utjecaj fluorescentne rasvjete pa su iz tog razloga niže brzine strujanja i više temperature zraka. Unatoč tome, nigdje u ravnini se ne pojavljuje brzina strujanja veća ili jednaka 0.25 m/s (najveća izmjerena brzina strujanja zraka je u točki (7.35,0.1,-1.3245) i iznosi $w_{\max,0.1} = 0.20264$ m/s)), što je gornja granica dozvoljene brzine strujanja, a *PD* ni u jednoj mjernoj točki ravnine nije prekoračio 15 % pa se može zaključiti da je distribucija brzine strujanja i temperature strujanja zraka pri dnu prostorije zadovoljavajuća.

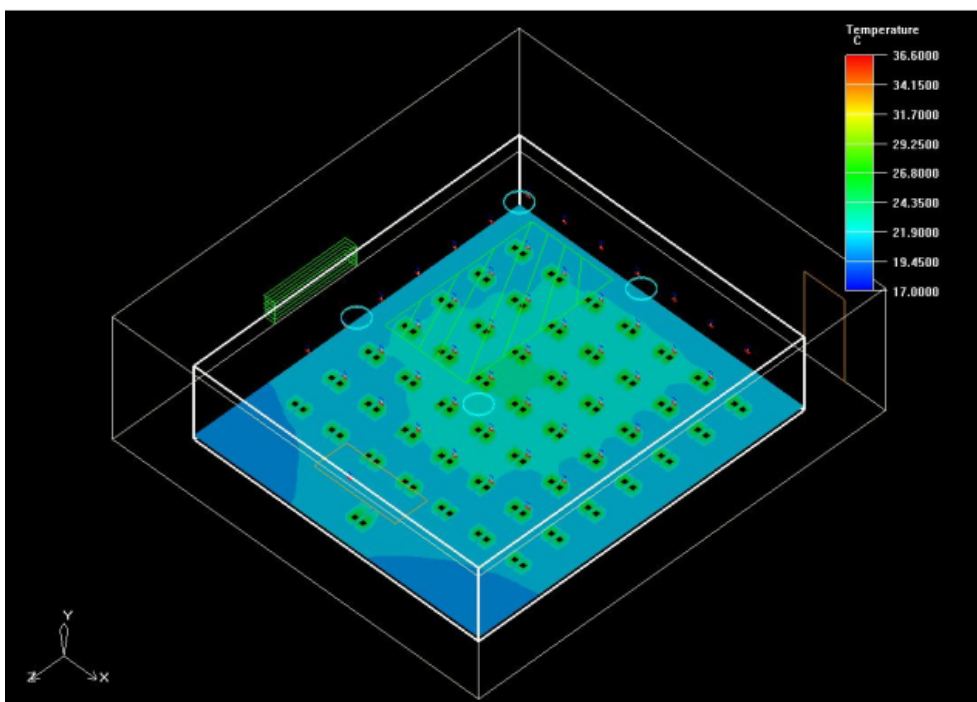
Slike 22 i 23 prikazuju distribuciju brzine strujanja i temperatura zraka u ravnini udaljenoj 10 cm od poda. U gornjem desnom kutu prikaza je ljestvica brzina strujanja, odnosno temperatura zraka u kojoj svaka boja označava neki iznos brzine strujanja, odnosno temperature zraka u određenom dijelu ravnine.



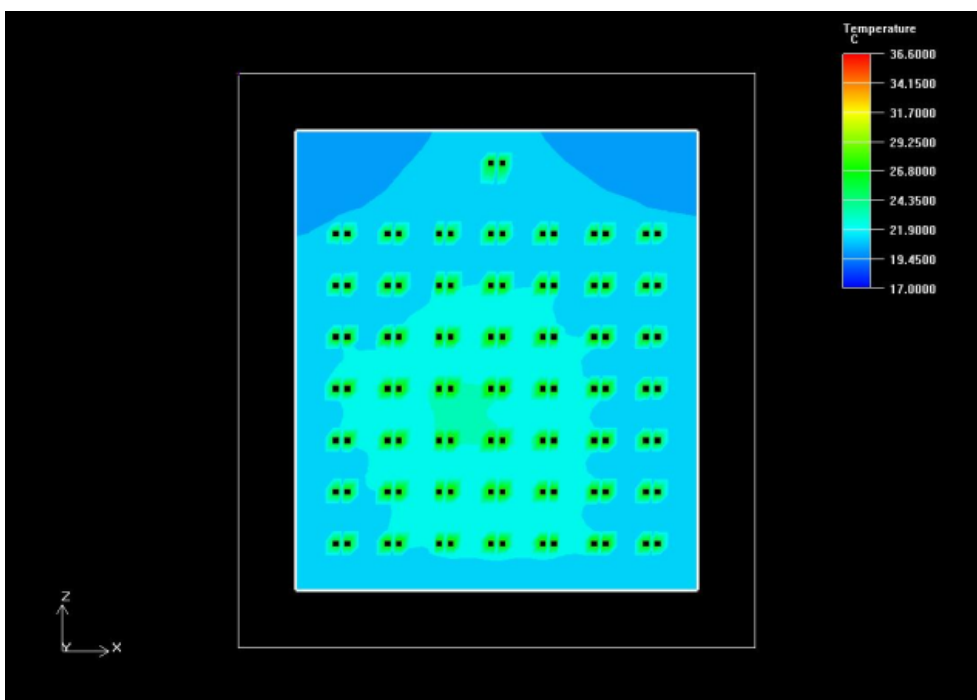
Slika 22. Izometrijski prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini udaljenoj 10 cm od poda



Slika 23. Tlocrtni prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini udaljenoj 10 cm od poda

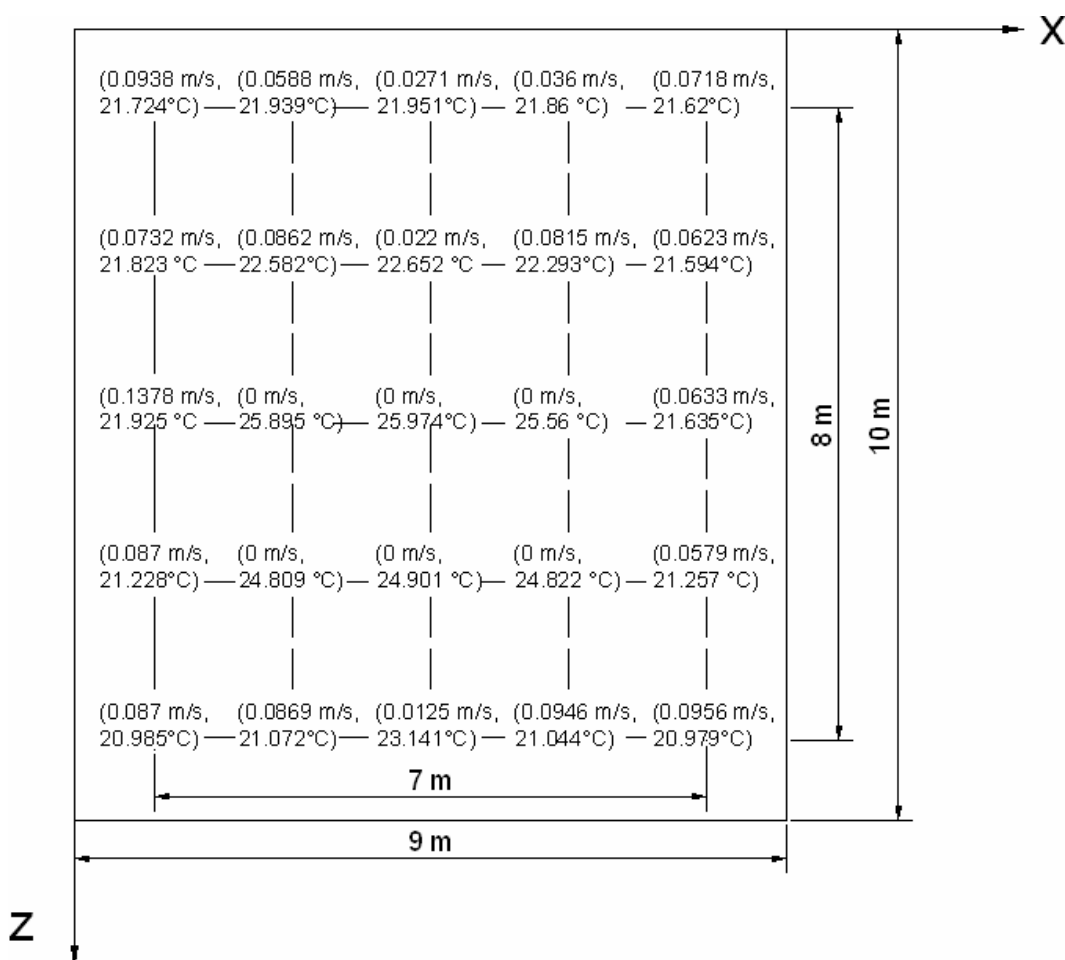


Slika 24. Izometrijski prikaz distribucije temperature zraka u ravni udaljenoj 10 cm od poda



Slika 25. Tlocrtni prikaz distribucije temperature zraka u ravni udaljenoj 10 cm od poda

2.4.4.3. Proračun PD-a u ravlini udaljenoj 110 cm od poda



Slika 26. Dijagramski prikaz iznosa brzina i temperatura u točkama ravnine udaljene 110 cm od poda

U ravlini udaljenoj 110 cm od poda simulacijom dobivena vrijednost SD iznosi $SD = 0,0263$ m/s.

Iznos parametra PD u točkama ravnine udaljene 110 cm od poda					
	x=1 m	x=2.75m	x=4.5 m	x=6.25m	x=8 m
z=-9 m	5,569	2,025	0	0	3,641
z=-7 m	3,727	4,583	0	4,329	2,561
z=-5 m	8,422	0	0	0	2,672
z=-3 m	5,214	0	0	0	1,995
z=-1 m	5,312	5,272	0	5,939	6,049

Tablica 7. Vrijednosti parametra PD u točkama ravnine udaljene 110 cm od poda

2.4.4.4. Analiza distribucije brzine strujanja i temperature zraka u ravnini udaljenoj 110 cm od poda

Simulacije distribucije brzine strujanja zraka u ravnini udaljenoj 110 cm od poda pokazale su da su brzine strujanja zraka niže u usporedbi s brzinama strujanja u ravnini udaljenoj 10 cm od poda. S druge strane, temperature zraka su u prosjeku više od onih u ravnini bliže podu. Neke temperature u mjernim točkama ravnine dostižu vrijednosti i do 26°C (točka (4.5,-5)) što je vidljivo i na slikama 28 i 29 gdje je područje oko ljudi nešto zelenije, što prema temperaturnoj skali u gornjem desnom kutu odgovara nešto višim temperaturama od pretpostavljene temperature prostorije od 24°C. Razlog višim temperaturama u uskom pojasu oko ljudi je taj što su ljudi definirani kao izvor topline, stoga te temperature ne treba shvatiti kao mjerodavne za ocjenu temperaturne distribucije u ravnini.

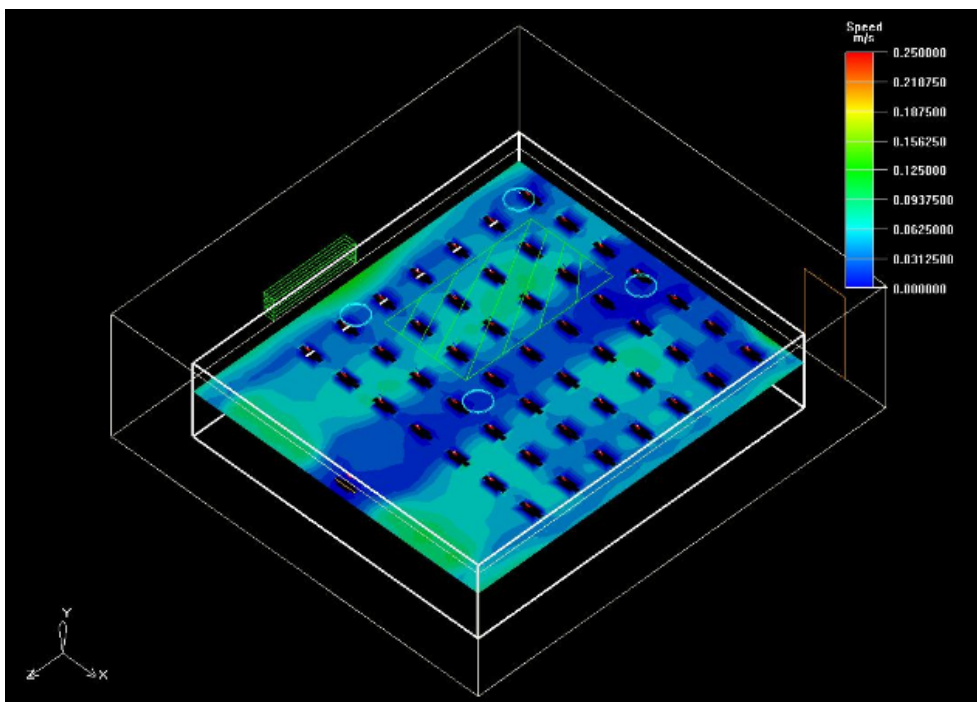
Niže brzine strujanja i nešto više temperature zraka utjecale su i na vrijednosti parametra PD koji je gotovo u svim mjernim točkama niži od PD -a u ravnini na 10 cm od poda pa je samim time i vjerojatnost propuha manja.

Najniže vrijednosti parametra PD zabilježene su na koordinati $x = 4.5$ m i sve iznose 0 m/s što ukazuje na činjenicu da su ili svi iznosi brzina strujanja niži od 0.05 m/s ili da je upravo u tim točkama neki dio tijela osobe pa je zbog toga izmjerena brzina jednaka nuli.

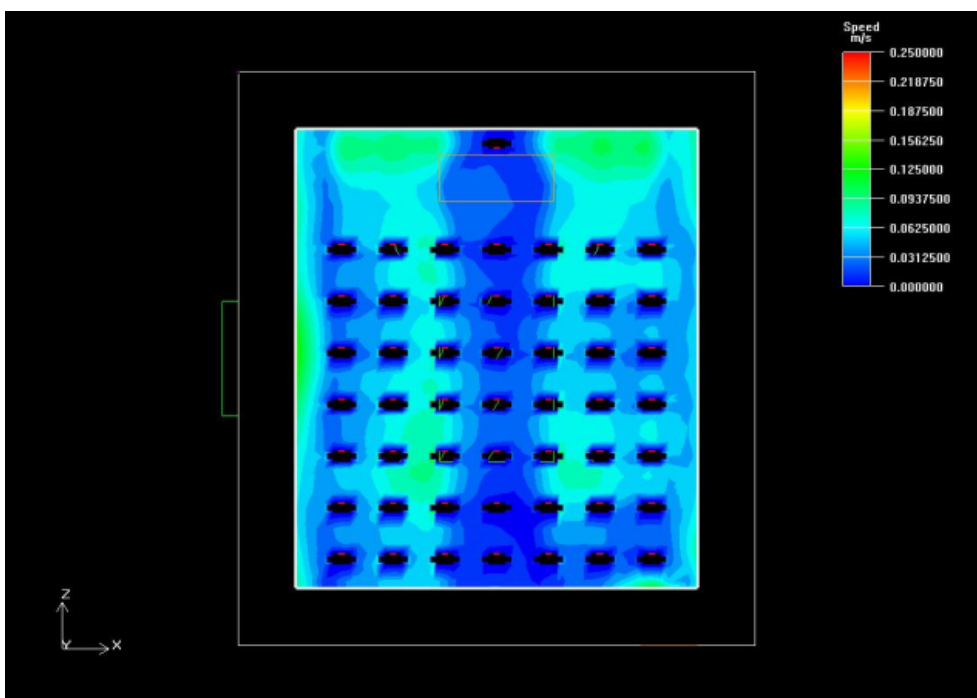
Kao i u prethodnoj ravnini, najveće su brzine strujanja u rubnoj zoni, a najniže u središtu ravnine i nigdje ne prelaze 0.25 m/s. Isto tako se iz slike 27 vidi da su nešto više brzine strujanja u odnosu na susjedne točke zabilježene na koordinatama $x = 3$ m i $x = 6$ m, jer su upravo na tim koordinatama smješteni difuzori, a budući da se nalazimo nešto bliže stropu polako se pojačava i njihov utjecaj. Najveći iznos brzine strujanja u ravnini Airpak je pronašao u točki

(3.41461 1.1, -6.76661) i ona iznosi: $w_{\max,1.1} = 0.156034 \cdot \text{m/s}$

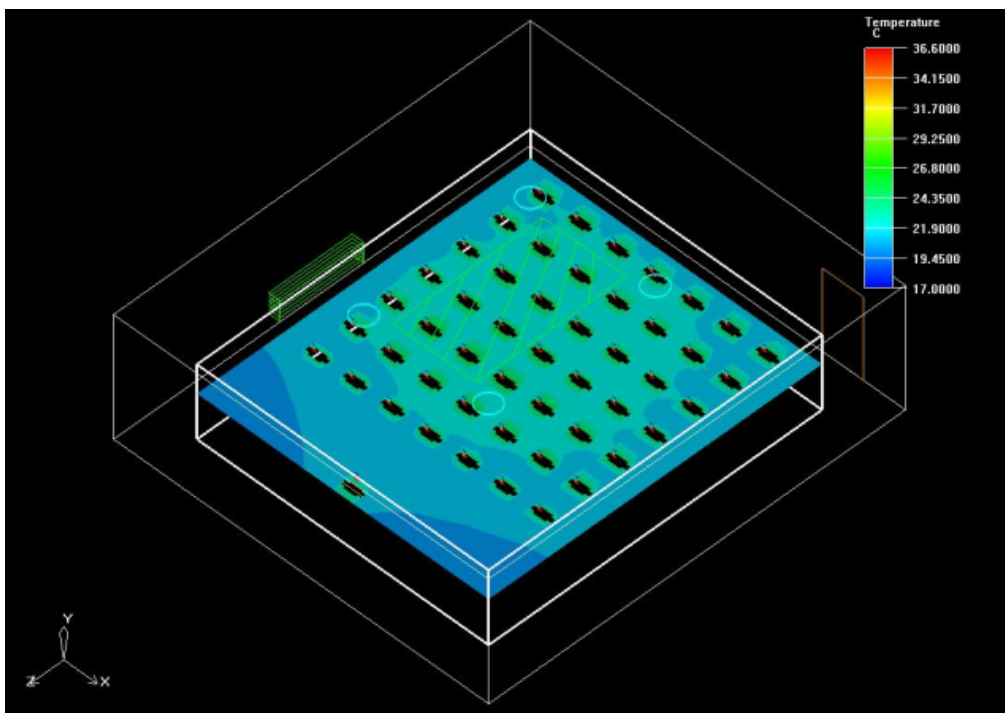
Što se temperaturne distribucije tiče ona je dosta slična temperaturnoj distribuciji ravnine 10 cm od poda, s tim da je u središtu zone boravka ove ravnine jači utjecaj fluorescentne rasvjete pa je i nešto veće područje viših temperatura što je prikazano i na slikama 29 i 30.



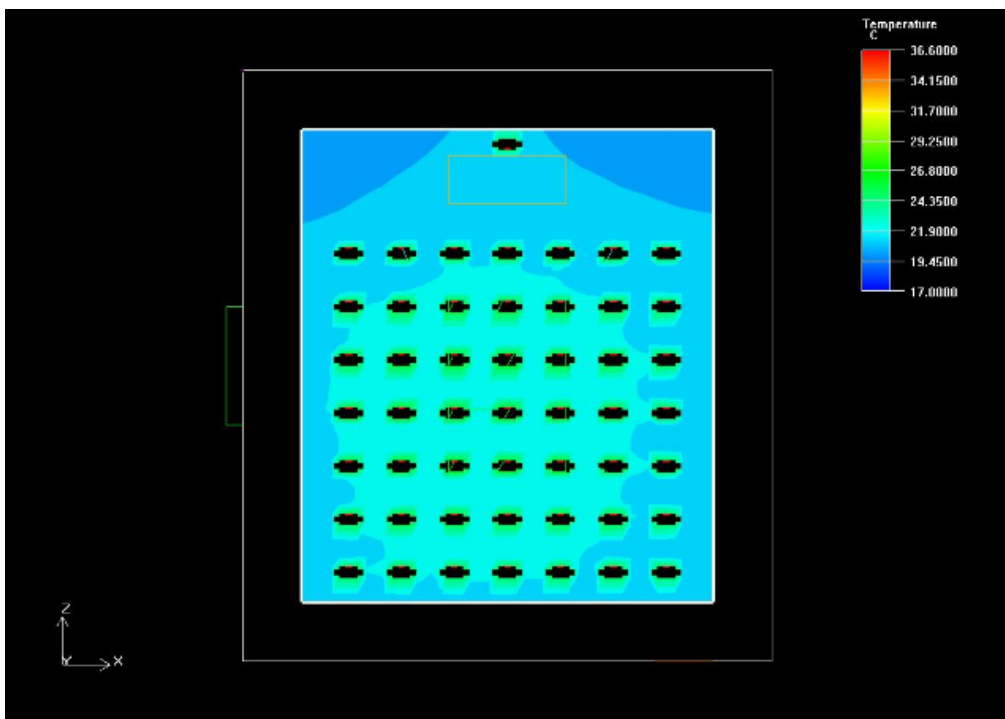
Slika 27. Izometrijski prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini udaljenoj 110 cm od poda



Slika 28. Tlocrtni prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini udaljenoj 110 cm od poda

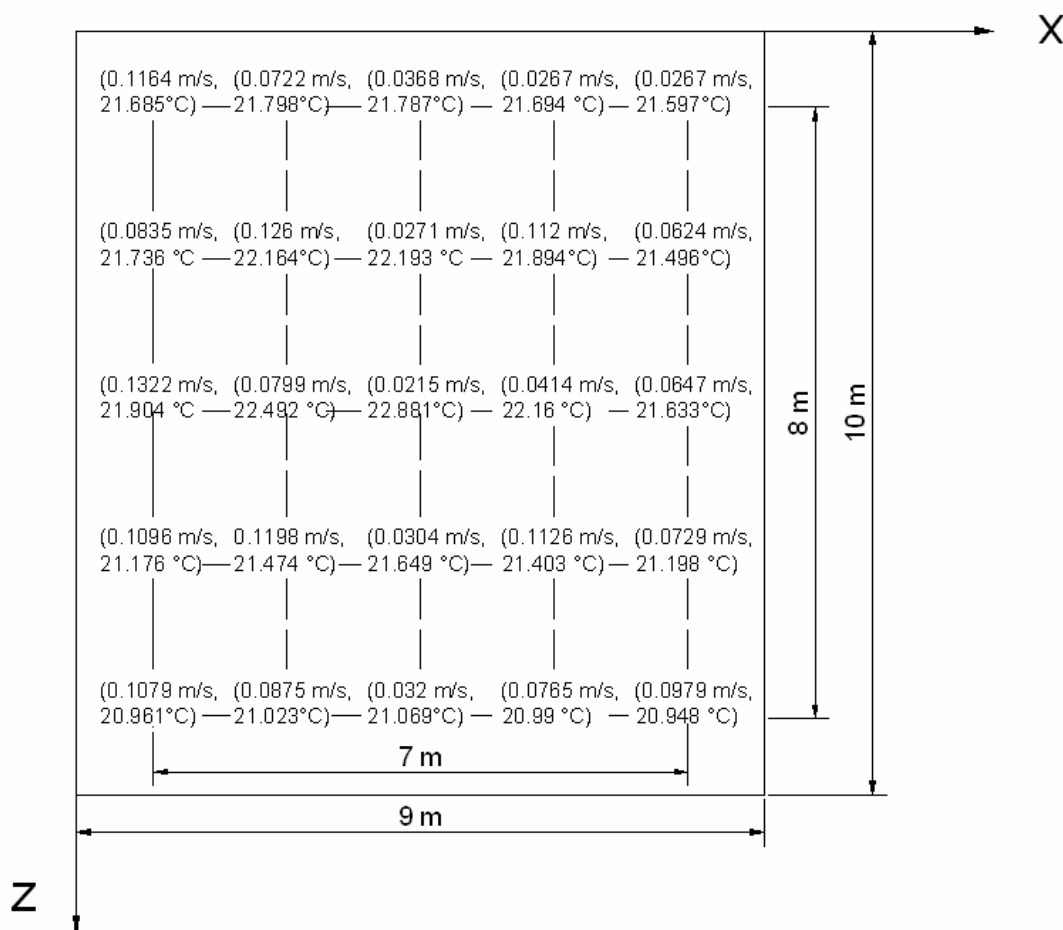


Slika 29. Izometrijski prikaz distribucije temperature zraka u ravni udaljenoj 110 cm od poda



Slika 30. Tlocrtni prikaz distribucije temperature zraka u ravni udaljenoj 110 cm od poda

2.4.4.5. Proračun PD-a u ravlini udaljenoj 180 cm od poda



Slika 31. Dijagramski prikaz iznosa brzina i temperatura u točkama ravnine udaljene 180 cm od poda

U ravlini udaljenoj 180 cm od poda simulacijom dobivena vrijednost SD iznosi $SD = 0,0281\text{m/s}$

Iznos parametra PD u točkama ravnine udaljene 180 cm od poda					
	x=1 m	x=2.75m	x=4.5m	x=6.25m	x=8 m
z=-9 m	7,227	3,632	0	0	0
z=-7 m	4,713	7,550	0	6,808	2,588
z=-5 m	8,105	4,120	0	0	2,848
z=-3 m	7,035	7,582	0	7,124	3,884
z=-1 m	7,028	5,347	0	4,319	6,257

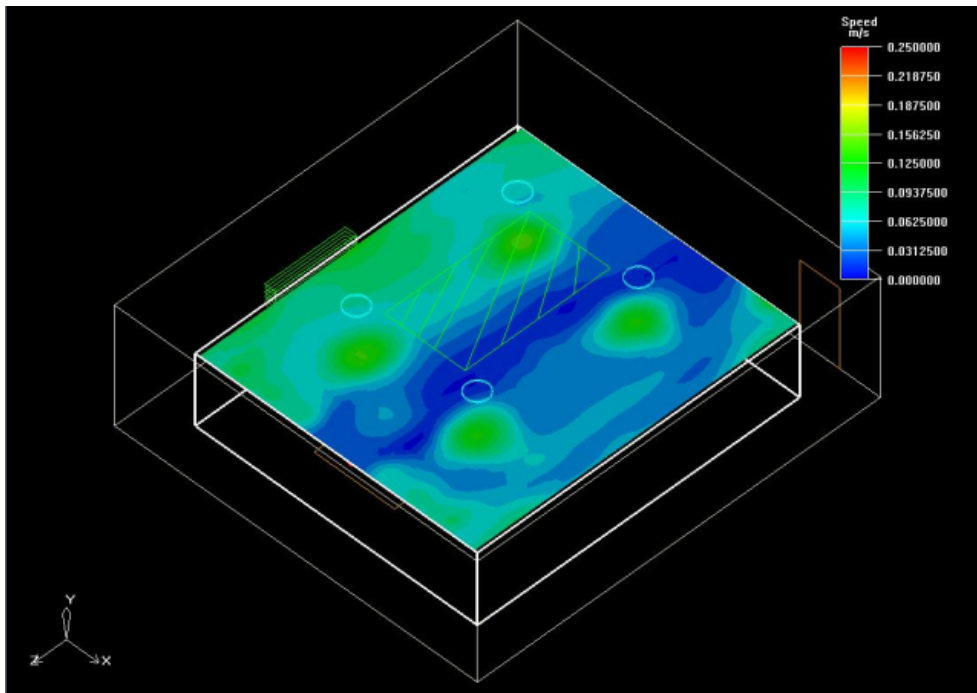
Tablica 8. Vrijednosti parametra PD u točkama ravnine udaljene 180 cm od poda

2.4.4.6. Analiza distribucije brzine strujanja i temperature zraka u ravnini udaljenoj 180 cm od poda

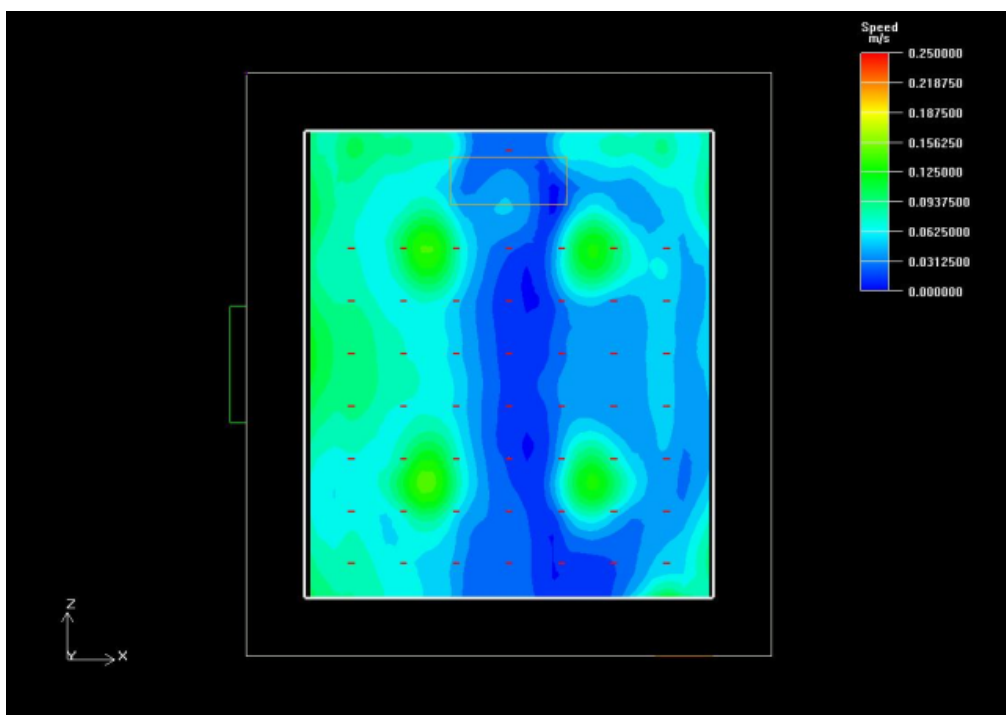
Ravnina na 180 cm od poda je ujedno i početak zone boravka gledano od stropa prema podu i u njoj je naročito bitno da brzine strujanja s kojima zrak ulazi u zonu boravka ne prelaze 0.25 m/s, jer bi to značilo i opasnost od pojave propuha.

Najveća brzina u toj ravnini, $w_{\max,1.8} = 0.15211 \text{ m/s}$, zabilježena je u točki (3,1.8,-7,05), odnosno točno ispod difuzora. Inače, pri simetričnom razmještaju četiri difuzora postoji opasnost od propadanja mlaza točno u sredini između njih, što se nije dogodilo u ovom slučaju (brzine strujanja zraka su čak niže od 0.05 m/s). U ovoj su ravnini, kako je pokazala simulacija, najviše brzine u području ispod difuzora, za razliku od prethodnih ravnina gdje su obično veće brzine strujanja zraka bile smještene uz rubno područje zone boravka. U skladu s tim je i veća vrijednost *PD*-a u točkama koje se nalaze ispod difuzora, iako je i u ovoj ravnini najveća vrijednost zabilježena u rubnoj zoni u točki (1,1.8,-5).

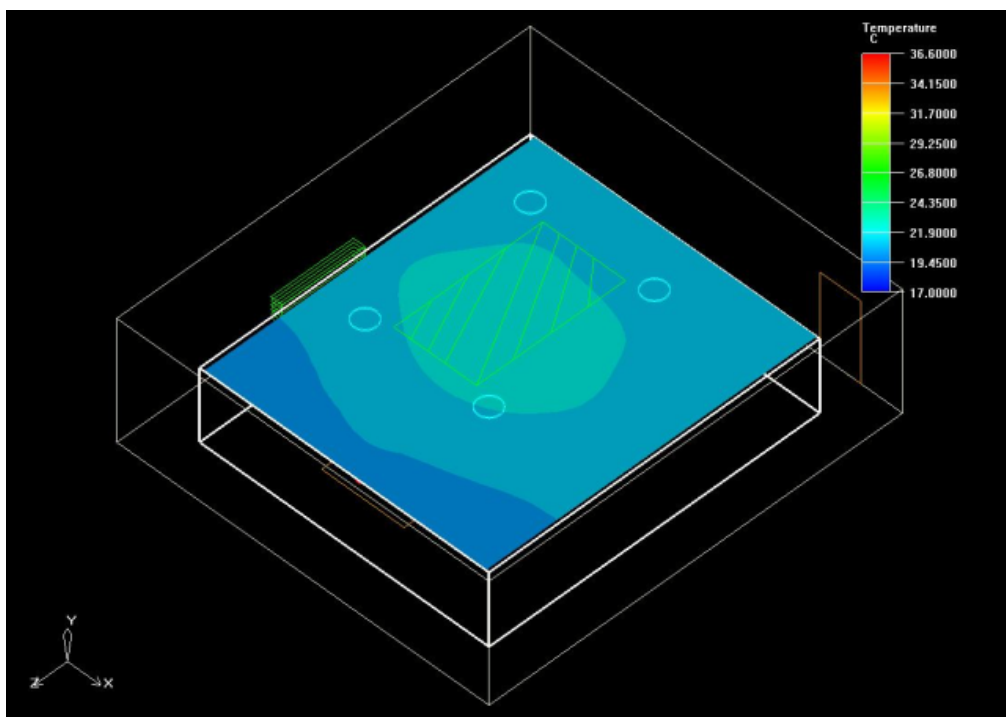
Najviše temperature u ovoj ravnini zabilježene su u pojasu oko središta fluorescentne rasvjete, jednako kao i u prethodne dvije ravnine.



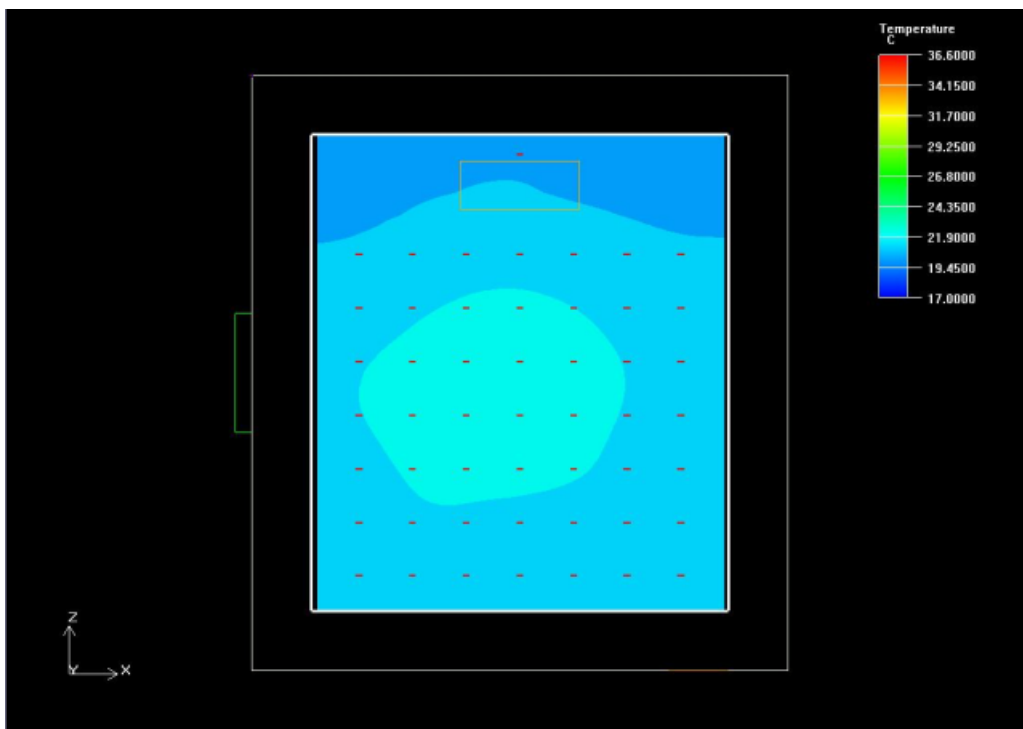
Slika 32. Izometrijski prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini udaljenoj 180 cm od poda



Slika 33. Tlocrtni prikaz distribucije brzine strujanja zraka u ravnini udaljenoj 180 cm od poda



Slika 34. Izometrijski prikaz distribucije temperature zraka u ravnini udaljenoj 180 cm od poda



Slika 35. Tlocrtni prikaz distribucije temperature zraka u ravnini udaljenoj 180 cm od poda

3. ZAKLJUČAK

Modeliranje rubnih uvjeta istrujavanja zraka iz stropnih vrtložnih difuzora složen je postupak. Ukoliko se promijeni bilo koji od ulaznih parametara "mometnum" metode ili $k-\varepsilon$ modela turbulencije slika profila mlaza izgledati će drugačije, što su neki od mogućih razloga odstupanja u izgledu profila mlaza dobivenog CFD simulacijom u odnosu na eksperimentalno dobiveni mlaz.

Kao mogući razlog pogreške može se navesti i složenost strujanja mlaza ubačenog iz vrtložnog stropnog difuzora. Naime, mlaz vrtložnog stropnog difuzora se u blizini istrujnog otvora ponaša kao prilijepljen, a što se više udaljava od ishodišta difuzora to više slabi vrtloženje i strujanje poprima radijalni karakter. Osim navedenih razloga, složena geometrija vrtložnih stropnih difuzora i male dimenzije u odnosu na prostoriju također ne idu u korist dobivanju sličnijih rezultata profila brzina zračnog mlaza. Uz sve navedeno tu je naravno i ljudski faktor kao možda najveći razlog pogreške.

S druge strane, prikaz distribucije brzine i temperature zraka u sobi za prezentacije ventilirane vrtložnim stropnim difuzorima promatrano sa stajališta toplinskih uvjeta je sasvim zadovoljavajući.

Iako uz pojednostavljenje modeliranja toplinskih rubnih uvjeta, rezultati koji su dobiveni simulacijom kvalitativno ne pokazuju neke veće pogreške.

I na kraju svega mogu reći da je simuliranje strujanja zraka vrlo zanimljiv proces koji zahtijeva vrlo širok spektar znanja iz područja klimatizacije i mehanike fluida pa greške koje su dobivene u radu ne čude, već mogu poslužiti kao poticaj za daljnji nastavak obrazovanja u ovom smjeru da bi se iste u budućnosti znale otkloniti.

POPIS LITERATURE

[1.] Chen, Srebric : "Simplified Diffuser Boundary Conditions for Numerical Room Airflow Models", ASHRAE, 20.ožujak 2001.

[2.] 2005 ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI);Chapter 33 :
"Space Air Diffusion"

[3.] CIBSE Guide B: "Heating, Ventilating, Air Conditioning and Refrigeration";
Chapter 2 : "Ventilation and air conditioning" ;CIBSE 2001-2002.

[4.] Klimaoprema d.d. : "Stropni vrtložni distributer tip DVS", Samobor

[5.] Brüel, Kjær : "Thermal comfort", INNOVA Air-Tech Instruments, 1996.

[6.] Galaso I. : "Određivanje toplinskog opterećenja prostorije", FSB Zagreb, 1992.

[7.] Balen I. : "Podloge za kolegij klimatizacija šk.god. 2007/2008".:

1. "Toplinska ugodnost"

http://www.fsb.hr/atlantis/upload/newsboard/01_03_2008_7911_1_TUGOD-KLIM07.pdf

2. "Ventilacijski zahtjevi"

http://www.fsb.hr/atlantis/upload/newsboard/01_03_2008_7911_2-VZAHT-KLIM07.pdf

3. "Sustavi ventilacije"

http://www.fsb.hr/atlantis/upload/newsboard/01_03_2008_7911_3_VSIS-KLIM07.pdf

4. "Razdioba zraka"

http://www.fsb.hr/atlantis/upload/newsboard/01_03_2008_7911_8_KANAL-KLIM07.pdf